

SEMICONDUCTOR LASER, SEMICONDUCTOR LIGHT-EMITTING ELEMENT AND ITS MANUFACTURE

Patent Number: JP11340580
Publication date: 1999-12-10
Inventor(s): DOUMEN MEGUMI; KURAMATA AKITO; KUBOTA SHINICHI; SOEJIMA REIKO
Applicant(s):: FUJITSU LTD
Requested Patent: ☐ JP11340580
Application Number: JP19980215147 19980730
Priority Number(s):
IPC Classification: H01S3/18 ; H01L21/205
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To reduce the threshold current density of a short wavelength semiconductor laser by constituting the thickness of an active layer with the single gain layer to be larger than a specified thickness, and an optical guide layer installed between the active layer and a clad layer.

SOLUTION: A clad layer 2 is formed on a substrate 1. An active layer 4 is formed of a single gain layer, whose thickness is not less than 3 nm on the clad layer 2 through an optical guide layer 3. Namely, a single-well layer is formed when quantum well structure is formed, and the single active layer is formed, when structure is not formed. Consequently, the scattering of impurities is reduced and the mobility of holes is improved by setting the active layer 4 to be an undoped layer. A clad layer 6 is stacked and formed on the active layer 4 through a light guide layer 5. Thus, the threshold current density of a short wavelength semiconductor laser can be reduced.

Data supplied from the esp@cenet database - 12

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平11-340580

(43)公開日 平成11年(1999)12月10日

(51)Int.Cl.⁸

識別記号

F I

H 0 1 S 3/18

H 0 1 S 3/18

H 0 1 L 21/205

H 0 1 L 21/205

// H 0 1 L 33/00

33/00

C

審査請求 未請求 請求項の数60 O L (全 57 頁)

(21)出願番号 特願平10-215147

(22)出願日 平成10年(1998)7月30日

(31)優先権主張番号 特願平9-204364

(32)優先日 平9(1997)7月30日

(33)優先権主張国 日本(J P)

(31)優先権主張番号 特願平9-213672

(32)優先日 平9(1997)8月7日

(33)優先権主張国 日本(J P)

(31)優先権主張番号 特願平9-263158

(32)優先日 平9(1997)9月29日

(33)優先権主張国 日本(J P)

(71)出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72)発明者 堂免 恵

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(72)発明者 倉又 朗人

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内

(74)代理人 弁理士 柏谷 昭司 (外2名)

最終頁に続く

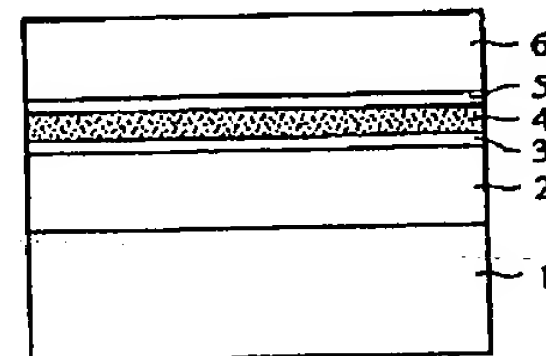
(54)【発明の名称】 半導体レーザ、半導体発光素子、及び、その製造方法

(57)【要約】

本発明の原理的構成の説明図

【課題】 半導体レーザ、半導体発光素子、及び、その製造方法に関し、ナイトライド系化合物半導体を用いた短波長半導体レーザのしきい値電流密度を低減する。

【解決手段】 活性層4を厚さが3nm以上の単一の利得層で構成すると共に、活性層4とクラッド層2、6との間に光ガイド層3、5を設ける。



1:基板
2:クラッド層
3:光ガイド層
4:活性層
5:光ガイド層
6:クラッド層

【特許請求の範囲】

【請求項1】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層を厚さが3 nm以上の単一の利得層で構成すると共に、前記活性層とクラッド層との間に光ガイド層を設けることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項2】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層を厚さが3 nm以上の単一の利得層で構成すると共に、前記活性層をアンドープ層としたことを特徴とする半導体レーザ。

【請求項3】 上記アンドープ層の不純物濃度が、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であることを特徴とする請求項2記載の半導体レーザ。

【請求項4】 上記利得層の厚さが、6 nm以上であることを特徴とする請求項1または2に記載の半導体レーザ。

【請求項5】 上記利得層の厚さを、30 nm以下にしたことを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項6】 上記利得層の厚さを、10 nm未満にしたことを特徴とする請求項5記載の半導体レーザ。

【請求項7】 上記利得層と上記光ガイド層との間にバリア層を設け、単一量子井戸構造を構成することを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項8】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層を2層の利得層を有する多重量子井戸構造で構成することを特徴とする半導体レーザ。

【請求項9】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層を1層の厚さが6 nm以上の2層または3層の利得層を有する多重量子井戸構造で構成することを特徴とする半導体レーザ。

【請求項10】 上記利得層を、アンドープ層で構成することを特徴とする請求項8または9に記載の半導体レーザ。

【請求項11】 上記利得層が、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ （但し、 $0 \leq x < 1$ 、 $0 < y \leq 1$ ）で構成されることを特徴とする請求項1乃至10のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項12】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層として多重量子井戸構造を用いると共に、放射光強度分布の最大位置が前記活性層の中心位置よりp型クラッド層側にずれていることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項13】 上記放射光強度分布の最大位置が、上記多重量子井戸構造のp型クラッド層側から第1番目の量子井戸の位置に一致していることを特徴とする請求項12記載の半導体レーザ。

【請求項14】 上記活性層とn型クラッド層及びp型

クラッド層との間に、それぞれn側光ガイド層及びp側光ガイド層を設けると共に、前記n側光ガイド層の禁制帯幅を前記p側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする請求項12または13に記載の半導体レーザ。

【請求項15】 上記活性層とn型クラッド層及びp型クラッド層との間に、それぞれn側光ガイド層及びp側光ガイド層を設けると共に、前記p側光ガイド層の層厚を前記n側光ガイド層の層厚より厚くすることを特徴とする請求項12乃至14のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項16】 上記半導体レーザのn型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする請求項12乃至15のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項17】 活性層として単一量子井戸構造を用いると共に、前記活性層とp側光ガイド層との間に広禁制帯幅層を設けたナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、前記広禁制帯幅層に起因する放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とのずれをn側層により補償することを特徴とする半導体レーザ。

【請求項18】 上記n側層が少なくともn側光ガイド層であり、前記n側光ガイド層の禁制帯幅を上記p側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする請求項17記載の半導体レーザ。

【請求項19】 上記n側層が少なくともn側光ガイド層であり、前記n側光ガイド層の層厚を上記p側光ガイド層の層厚より薄くすることを特徴とする請求項17または18に記載の半導体レーザ。

【請求項20】 上記n側層が少なくともn型クラッド層であり、前記n型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする請求項17乃至19のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項21】 上記量子井戸構造の活性層を構成する井戸層が、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ （但し、 $0 \leq x < 1$ 、 $0 < y \leq 1$ ）で構成されることを特徴とする請求項12乃至20のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項22】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層が InGaIn 或いは GaIn のいずれかからなり、且つ、前記p側光ガイド層の不純物濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項23】 上記p側光ガイド層が、アンドープ層であることを特徴とする請求項22記載の半導体レーザ。

【請求項24】 上記p側光ガイド層におけるホールの移動度が、 $2 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上であることを特徴とする請求項22または23に記載の半導体レーザ。

【請求項25】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の層厚をn側光

ガイド層の層厚より薄くしたことを特徴とする半導体レーザ。

【請求項26】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の層厚が、0.1 μm 未満であることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項27】 上記p側光ガイド層の禁制帯幅を、上記n側光ガイド層の禁制帯幅より大きくしたことを特徴とする請求項25または26に記載の半導体レーザ。

【請求項28】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の禁制帯幅が活性層に隣接する部分で小さく、且つ、p型クラッド層に隣接する部分で大きくなっていることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項29】 上記p側光ガイド層の禁制帯幅が、階段的に変化していることを特徴とする請求項28記載の半導体レーザ。

【請求項30】 上記p側光ガイド層の禁制帯幅が、連続的に変化していることを特徴とする請求項28記載の半導体レーザ。

【請求項31】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の禁制帯幅が活性層に隣接する側からp型クラッド層に隣接する側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項32】 上記p側光ガイド層を構成する禁制帯幅の小さな層がInGa_N或いはGa_Nからなり、且つ、禁制帯幅の大きな層がAlGa_Nからなることを特徴とする請求項28乃至31のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項33】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子において、共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が90 meV以下であることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項34】 上記共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が、50 meV以下であることを特徴とする請求項33記載の半導体発光素子。

【請求項35】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子において、共振器内の活性層の転位密度を 10^9 cm^{-2} 以下とすることを特徴とする半導体発光素子。

【請求項36】 上記共振器内の活性層の転位密度を、 10^8 cm^{-2} 以下とすることを特徴とする請求項35記載の半導体発光素子。

【請求項37】 上記活性層が、Inを構成要素として含むことを特徴とする請求項32乃至36のいずれか1項に記載の半導体発光素子。

【請求項38】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子の製造方法において、活性層を成長させる際の成長速度を0.1 $\mu\text{m}/\text{時}$ 以上とすることを特徴とする半導体発光素子の製造方法。

【請求項39】 上記成長速度を、0.2 $\mu\text{m}/\text{時}$ 以上としたことを特徴とする請求項38記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項40】 上記成長速度を、0.3 $\mu\text{m}/\text{時}$ 以上としたことを特徴とする請求項38記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項41】 成長基板としてSiC基板を用いると共に、前記SiC基板の表面をエッチングしたことを特徴とする請求項38乃至40のいずれか1項に記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項42】 上記活性層が、Inを構成要素として含むことを特徴とする請求項38乃至41のいずれか1項に記載の半導体発光素子の製造方法。

【請求項43】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p型クラッド層を、2層の広禁制帯幅のp型半導体層の間に、狭禁制帯幅の中間層を挟んだ多層構造で構成することを特徴とする半導体レーザ。

【請求項44】 上記中間層が、単層の狭禁制帯幅層で構成されることを特徴とする請求項43記載の半導体レーザ。

【請求項45】 上記中間層が、上記2層の広禁制帯幅のp型半導体層の間の任意の位置で禁制帯幅が最低になるように禁制帯幅が連続的に変化していることを特徴とする請求項43記載の半導体レーザ。

【請求項46】 上記中間層が、広禁制帯幅の層と狭禁制帯幅の層を交互に複数層積層させた多層構造からなることを特徴とする請求項43記載の半導体レーザ。

【請求項47】 上記中間層を構成する広禁制帯幅の層と狭禁制帯幅の層との間の禁制帯幅が、連続的に変化していることを特徴とする請求項46記載の半導体レーザ。

【請求項48】 上記中間層の内の狭禁制帯幅側の層の少なくとも一部を、アンドープ層にしたことを特徴とする請求項43乃至47のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項49】 上記広禁制帯幅の層をAlGa_Nで構成するとともに、上記狭禁制帯幅の層をInGa_N、Ga_N、或いは、AlGa_Nのいずれかで構成することを特徴とする請求項43乃至48のいずれか1項に記載の半導体レーザ。

【請求項50】 ナイトライド系化合物半導体を用いた多重量子井戸構造半導体レーザにおいて、多重量子井戸活性層を構成するバリア層の厚さを5 nm未満とすることを特徴とする多重量子井戸構造半導体レーザ。

【請求項51】 上記多重量子井戸活性層を構成するバリア層が、In組成比が0.04以上のInGa_Nによって構成されることを特徴とする請求項50記載の多重量子井戸構造半導体レーザ。

【請求項52】 ナイトライド系化合物半導体を用いた

半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層の不純物濃度を、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満とすることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項53】 上記活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層を、アンドープ層とすることを特徴とする請求項52記載の半導体レーザ。

【請求項54】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のp側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項55】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項56】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側及びp側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項57】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とすることを特徴とする半導体レーザ。

【請求項58】 ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザの製造方法において、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層の成長温度を $600^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ としたことを特徴とする半導体レーザの製造方法。

【請求項59】 上記エレクトロンブロック層の成長温度を活性層の成長温度と同じにしたことを特徴とする請求項58記載の半導体レーザの製造方法。

【請求項60】 上記エレクトロンブロック層のMg濃度が $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上になるようにMgをドーピングすることを特徴とする請求項58または59に記載の半導体レーザの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は半導体レーザ、半導体発光素子、及び、その製造方法に関するものであり、特に、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおけるしきい値電流密度 J_{th} を低減するための構成に特徴のある短波長半導体レーザ及びその製造方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、短波長半導体レーザは、光ディスクやDVD等の光源として用いられているが、光ディスクの記録密度はレーザ光の波長の二乗に反比例するため、より短い波長の半導体レーザが要請されており、現在商品化されている最短波長の半導体レーザは $630 \sim 650 \text{ nm}$ 近傍に波長を有する赤色半導体レーザであり、昨年発売されたDVDに用いられている。

【0003】しかし、より記録密度を高めるためにはさらなる短波長化が必要であり、例えば、光ディスクに動画を2時間記録するためには波長が 400 nm 近辺の青色半導体レーザが不可欠となり、そのため、近年では次世代光ディスク用光源として、青色領域に波長を有する短波長半導体レーザに開発が盛んになされている。

【0004】このような青色半導体レーザ用材料としては、II-VI族化合物半導体のZnSe系と、III-V族化合物半導体のGaN系とが研究されており、この内、ZnSe系は高品質の基板として実績の高いGaAsにはほぼ格子整合することから、長い間ZnSe系の方が有利であると考えられ、世界中の研究者の大半がこのZnSe系の研究に従事していたという経緯があり、レーザの研究に関してはZnSe系の方が先んじている。

【0005】このZnSe系については、既に、注入励起による室温連続発振が報告されているが、本質的に劣化しやすい材料であることから信頼性が問題となり、未だ実用化には至っていない。

【0006】一方、GaN系の場合には、1993年末の日亜化学によるGaN高輝度LEDの発表を境に、ZnSe系でネックになっていた信頼性に関して耐環境性に優れるGaNが見直され、世界中で研究者の大きな増加を見ている。

【0007】次いで、1995年12月初めには、同じく日亜化学によりパルスレーザ発振の成功が報告されて以来、急速に研究が進み、室温連続発振(CW発振)において、35時間の発振持続時間が報告されて以来、現在では、加速試験で推定10000時間の発振持続時間が報告されている。

【0008】ここで、図31及び図32を参照して従来の短波長半導体発光素子を説明するが、図31(a)は従来の短波長半導体レーザの光軸に垂直な概略的断面図であり、図31(b)は短波長発光ダイオードの概略的断面図であり、また、図32はバッファ層構造の異なる短波長半導体レーザの光軸に垂直な概略的断面図である。

図31(a)参照

まず、(0001)面を主面とするサファイア基板811上に、GaNバッファ層812を介して、n型GaNバッファ層813、n型 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層814、n型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層815、n型GaN光ガイド層816、InGaNMQW活性層817、p型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層818、p型GaN光ガイド層819、p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層820、及び、p型GaNコンタクト層821をMOVPE法(有機金属気相成長法)によってエピタキシャル成長させる。

【0009】次いで、ドライ・エッチングによりn型GaNバッファ層813の一部を露出させて、Ti/Auからなるn側電極822を設けると共に、p型GaNコ

ンタクト層821上にはNi/Auからなるp側電極823を設けたのち、さらに、ドライ・エッチングを施して一対の平行な端面を形成し、この端面を共振器面にすることによってパルスレーザ発振に成功している（必要ならば、S. Nakamura et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 35, p. L74, 1996参照）。

【0010】図31(b)参照

また、発光ダイオードの場合には、サファイア基板811上に、GaNバッファ層812を介して、n型GaN層824、n型またはp型の $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 活性層825、及び、p型GaN層826をMOVPE法によってエピタキシャル成長させる。

【0011】この場合、低注入で動作する発光ダイオードとして実用的な発光輝度を得るためには、 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 活性層825のSi濃度或いはZn濃度を $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ にする必要があり、また、 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 活性層825の層厚は1~500nm、より好適には、10~100nmにする必要がある（必要ならば、特開平6-260682号公報、及び、特開平6-260683号公報参照）。

【0012】図32参照

図32は従来の他の短波長半導体レーザの光軸に垂直な断面図であり、まず、(0001)面を主面とするサファイア基板831上に、GaNバッファ層832を介して、n型GaN中間層833、n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層834、n型GaN光ガイド層835、MQW活性層836、p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層837、p型GaN光ガイド層838、p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層839、及び、p型GaNコンタクト層840をMOVPE法によって順次エピタキシャル成長させる。

【0013】次いで、図31(a)の場合と同様に、ドライ・エッチングによりp型GaNコンタクト層840及びp型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層839をメサエッチングすると共に、n型GaN中間層833の一部を露出させて、n型GaN中間層833の露出部にTi/Auからなるn側電極841を設けると共に、p型GaNコンタクト層840上にはストライプ状開口を有する SiO_2 膜842を介してNi/Auからなるp側電極843を設け、次いでドライ・エッチングを施して共振器面となる一対の平行な端面を形成したものである。

【0014】また、オーバーフロー防止層、即ち、キャリアストッパー層をn型層側にも設けることも提案されており（必要ならば、特開平10-56236号公報参照）、この場合には、n型不純物濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドープのn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 層を正孔ストッパー層として、また、p型不純物濃度が $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgドープのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 層を電子ス

トッパー層として活性層と光ガイド層との間に設けており、その際の成長温度はGaN或いはAlGaNを成長させる際の通常の成長温度である1100℃でる。

【0015】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来の短波長半導体レーザの場合、しきい値電流密度が 3.6 kA/cm^2 程度と、非常に大きいという問題があり、これは基板のサファイアに劈開性がないことのほかに、GaN系化合物半導体、即ち、ナイトライド系化合物半導体という材料が、光学利得を発生するためには、本質的に大きなキャリア密度を必要とするためである。

【0016】即ち、従来、実用化されている半導体レーザは、AlGaAs系やAlGaInP系等の閃亜鉛鉱型結晶構造のIII-V族化合物半導体を用いているのに対して、ナイトライド系化合物半導体は、非常に大きな禁制帯幅を有する六方晶ウルツ鉱構造であり、閃亜鉛鉱型結晶材料とは全く異なった物性を有しているためである。

【0017】この様なナイトライド系化合物半導体の物性上の大きな特徴は、六方晶であり結晶に異方性が存在すること、禁制帯幅が大きく有効質量が大きいこと、スピン軌道相互作用が小さく、価電子帯に、HH(Heavy Hole)、LH(Light Hole)、及び、CHの3つのバンドが近接して存在することの三つが挙げられる。

【0018】より、詳しく説明すると、まず、第1に、ホールの有効質量が大きいことに起因する特徴としては、

①ホールの有効質量が大きいこと、価電子帯の擬フェルミ準位 E_{Fp} が上がりにくいこと、また

②ホールの有効質量が大きく、また、LO(縦光学)フォノン散乱等が大きいこと、ホールの移動度が小さいこと、また、

③ホールの有効質量 m が大きいこと、温度 T におけるホールの平均速度、即ち、ホールの熱速度 v_p は、 $(m/2)v_p^2 = (3/2)kT$ から、 $v_p \propto m^{-1/2}$ となり、ホールの熱速度 v_p が小さいことが挙げられる。

【0019】第2に、価電子帯に、HH、LH、CHの3つのバンドが近接して存在し、その内の2つの有効質量が大きいことにより、ホールに対する擬フェルミ準位 E_{Fp} が上がりにくいことが原因で、

④反転分布を達成するために必要な伝導帯の擬フェルミ準位 E_{Fn} の上昇が従来材料よりも大きくなり、且つ、バリア層と井戸層、或いは、活性層と光ガイド層とを構成するGaN/InGaN、或いは、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ のヘテロ接合における価電子帯におけるエネルギー不連続 ΔE_v と禁制帯幅の差 ΔE_g との比、即ち、 $\Delta E_v/\Delta E_g$ が、従来の材料系では0.4程度であったのに対して0.7程度と大きく、界面におけるバンドのオフセットが3:7で価電子帯側に偏ると

いう特徴がある。

【0020】これらが原因となって、p型層側から活性層へのホールの注入が効率良く行われなくなり、特に、活性層が多重量子井戸(MQW)構造である場合、ホールの注入効率の悪さは量子井戸層(ウェル層)間のホール密度の不均一を生むことになり、且つ、活性層で有効に消費されない電子がp側へ溢れ出しp側光ガイド層或いはp型クラッド層へのオーバーフロー電流となることを、本発明者等はシミュレーションにより見出したのでこの事情を図33乃至図37を参照して説明する。なお、図33乃至図37にシミュレーションについては、エレクトロンブロック層、即ち、オーバーフロー防止層の設けない構成でシミュレーションしている。

【0021】図33参照

図33は、活性層近傍におけるフェルミ準位の変化を示すものであり、図において拡大した円内に示す様に、価電子帯におけるホールに対する擬フェルミ準位 E_{Fp} が、活性層においてp側光ガイド層より低エネルギー側にあることがわかる。

【0022】即ち、通常材料系においては、ホールの注入によって擬平衡状態に達し、活性層とp側光ガイド層の擬フェルミ準位 E_{Fp} はほぼ一致することになるが、ナイトライド系半導体材料においては、活性層とp側光ガイド層の擬フェルミ準位 E_{Fp} の不一致が非常に大きく、p側光ガイド層から活性層へホールが有効に注入されていないことを示している。

【0023】図34参照

図34は、ウェル層が5層のMQW構造短波長半導体レーザにおけるホール電流の層位置依存性を示す図であり、注入されたホールがどこで再結合により消滅するかをシミュレーションした結果を示した図であり、図から明らかな様に、p型クラッド層より注入されたホール電流は、活性層に達する前にp側光ガイド層で 4 kA/cm^2 だけ消費されている。

【0024】この消費された電流はレーザ発振に寄与しない無効電流であり、しきい値電流密度 J_{th} の増加につながるものであるが、この様に、p側光ガイド層での再結合が大きい理由は、p型クラッド層から活性層へのホールの注入効率が悪いためであると考えられる。

【0025】また、活性層がMQW構造である場合、ホールの注入効率の悪さは量子井戸層(ウェル層)間のホール密度の不均一を生み、レーザ発振を非効率にすることになるので、この事情を図35及び図36を参照して説明する。

図35参照

図35は、図33の状態における素子膜厚方向のホール密度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図から明らかなように、MQW活性層におけるホール密度がp側光ガイド層に近いほど大きく、不均一になっていることが理解される。

【0026】図36参照

図36は、同じく図33の状態における素子膜厚方向の電子密度分布のシミュレーション結果を示す図であり、図から明らかなように、n側光ガイド層側から注入されるMQW活性層における電子密度もp側光ガイド層に向かうほど大きく不均一になっていることが理解され、これは上述のホール不均一注入が原因で、電荷中性条件を満たすために電子がホールに引き寄せられる結果である。

【0027】この様に、ホールと電子ともに同様の不均一が起きていることによって、多重量子井戸構造中における光学利得の発生を著しく不均一にすることが予想されるので、この事情を図37を参照して説明する。

図37参照

図37は、上述のナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザの多重量子井戸中における光学利得分布の説明図であり、p型クラッド層側から第1番目の量子井戸においてはp型クラッド層からの正孔の供給が多いため、大きな光学利得を有しているが、n型クラッド層側へ向かうにつれて光学利得は減少し、n型クラッド層側の2つの量子井戸においては光学利得を発生しないばかりか、光の損失が生じるという従来の閃亜鉛鋅型結晶構造の半導体を用いたレーザと異なる特性となる。

【0028】即ち、閃亜鉛鋅型結晶構造の半導体を用いた従来の半導体レーザにおいては、MQW構造が5層程度の量子井戸層から構成される場合には、キャリアが均一に注入されることが常識であり、光通信用長波長レーザでは5~10層程度、DVD用赤色レーザでも5層程度用いているが、光学利得は均一に発生している。

【0029】この様な光学利得の量子井戸層間の不均一による光吸収層の発生は、二つの悪影響を与えることになり、第一は、光吸収層となっているn側の2つの量子井戸層においても、図35及び図36から明らかなようにキャリアが高密度に存在するため、再結合電流が大きいことを意味し、p側の3つの量子井戸層がレーザ発振のしきい値フェルミ準位に達する電流量をn側の2つの量子井戸層が増加させる結果となる。

【0030】第二に、n側の2つの量子井戸層が光吸収層であるために、レーザ発振するために克服すべき内部ロスが増加し、しきい値フェルミ準位 E_{Fth} そのものが上昇してしまうという悪影響が生ずることになる。

【0031】図38参照

図38は、多重量子井戸活性層における量子井戸層の数を変えて実際に作製したMQW半導体レーザの光出力-電流特性を示す図であり、この場合、全体の光閉じ込めを一定にするために膜厚を変化させているが、5層の量子井戸層からなる活性層を設けたMQW半導体レーザの方が3層の量子井戸層からなる活性層を設けたMQW半導体レーザの場合よりしきい値電流密度 J_{th} が高く、且つ、レーザ発振後の効率も悪いことがわかる。

【0032】これは、半導体レーザの効率に内部量子効率と内部ロスで決定されるため、 n 側の2つの量子井戸層が光吸収層になっていることによって、内部量子効率及び内部ロスの両者が劣化していることが原因であると考えられる。

【0033】また、従来のMQW構造半導体レーザでは、放射光電磁場の強度分布（放射光強度分布）が、図37に示す様に、活性層の中心位置に最大強度位置が来るように対称構造になっており、光学利得を発生する第1層目の量子井戸と最大強度位置とが一致していないため、光閉じ込めが有効に行われないう問題がある。

【0034】即ち、レーザ発振に寄与する実質的な利得は、光学利得に放射光強度分布を掛けたものであり、光学利得が大きくとも、その光学利得を発生する位置に放射光強度分布が存在しなければ発振に寄与できないことになる。

【0035】そして、実際には、放射光の活性層への分布は、全層を合計しても全体の光強度の約3%程度であるので、図37に示すようにただでさえ小さい光分布が最大光学利得を発生する層で大きくならないことは大きな問題となる。

【0036】また、現在報告されている、量子井戸層が10層乃至20層のMQWレーザの場合には、量子井戸構造全体では、光閉じ込めが充分であっても、実質的に、光学利得を発生している p 型クラッド層側から第1番目の量子井戸での光閉じ込めがかなり小さくなり、しきい値電流密度 J_{th} が増加するという問題がある。

【0037】さらに、上述の④の理由により、禁制帯幅の差 ΔE_g の影響の約70%が価電子帯側に現れ、伝導帯側のエネルギー不連続 ΔE_c は小さくなり、電子のオーバーフローが問題となるため、従来の短波長半導体レーザにおいては、オーバーフロー防止層或いはキャリアストップ層を設けているが、それによって、放射光強度分布がさらに n 側にずれた非対称構造となり、光学利得の大きな p 型クラッド層側から第1番目の量子井戸での光閉じ込めがさらに小さくなり、しきい値電流密度 J_{th} が増加するという問題がある。

【0038】したがって、ナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザの特性を改善するためには、しきい値電流密度 J_{th} を低減させることが必要になるが、そのためには、上述のキャリアの不均一注入を改善することが有効となる。

【0039】しかし、上述の様にナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザの場合には、ナイトライド系化合物半導体に特有な問題があり、従来の閃亜鉛鉱型結晶構造半導体の常識を適用するだけでは優れた解決手段が見つからず、ナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザに採用されている構成で、ナイトライド系化合物半導体には本質的ではない構成が無いか否かを検討することが必要になる。

【0040】そこで、検討するに、一般に、ホールの注入効率を改善するために、 p 側光ガイド層を p 型層とすることによりホール濃度を高めることが考えられるが、この場合には、かえって、ホールの注入効率が低下するという問題がある。即ち、ホールの注入効率が低い主たる原因は、 p 側光ガイド層におけるホールの移動度が小さいことであるが、 p 型ドーピングによって散乱が増えてホールの移動度を更に低下させることになる。さらに、 p 型不純物のドーピング濃度を高めても、不純物の活性化率が小さいため、ホール濃度がなかなか上がらないことも問題となる。

【0041】また、一般に、MQW半導体レーザにおけるキャリアの不均一注入を改善するためには、多重量子井戸構造におけるウェル層の膜厚を薄くすること、バリア層の厚さを薄くすること、及び、バリア層の高さを低く、即ち、禁制帯幅を小さくすることが有効であると考えられる。

【0042】この内、ウェル層の膜厚は、レーザの光学利得特性を大きく左右し、レーザ設計の最重要項目であるため、独立に変化させることは難しいという問題があり、また、ナイトライド系MQW青色半導体レーザにおいて、バリア層の禁制帯幅を小さくするという事は、バリア層中の In 組成を増加することを意味することになるが、これは歪の増加をもたらす、結晶性が劣化することになるので好ましくないため、この事情を図39を参照して説明する。

【0043】図39参照

図39は、バリア層として用いた $In_xGa_{1-x}N$ を用いた場合の発光効率の In 組成比 x 依存性についての実験結果を示す図であり、 In 組成比 x が大きいほど活性層にかかる歪がおおきくなり、発光効率が小さくなるため、バリア層の In 組成比 x を大きくできず、したがって、量子井戸構造のバリアを低くして注入効率を高めることができない。

【0044】一方、バリア層の膜厚については、従来の閃亜鉛鉱型結晶構造半導体を用いたレーザにおいては、膜厚が薄いと量子井戸層間の波動関数のしみ出しによる相互作用が無視できなくなり、階段状であるはずの光学利得分布がなまり、一定キャリア密度当たりの光学利得が発生が低下するため、5nm以上の厚さにしており、この構成をナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザにおいてもそのまま採用している。

【0045】しかし、ナイトライド系化合物半導体を用いたMQW半導体レーザにおいては、上述のようにキャリアの有効質量が大きいため、量子井戸からの波動関数のしみ出しが少なく、且つ、バンド・ギャップの不均一性のため階段状の光学利得分布がもともと若干なまっております、そのため、5nm以上の膜厚は本質的な要件ではないとの結論に至った。

【0046】また、上述の様に、活性層で有効に消費さ

れない電子がp側へ溢れ出しp側光ガイド層或いはp型クラッド層へのオーバーフロー電流となるとともに、p側光ガイド層から活性層へのホールの注入効率が悪いことが原因で、p側光ガイド層に溜まったホールが電子をp側層へと引き寄せることによって、オーバーフローを増加させることになる。

【0047】さらに、上述の④の理由により、ヘテロ接合界面におけるバンドのオフセットが3:7で価電子帯側に偏り、伝導帯側のエネルギー不連続 ΔE_c は小さくなるので、この点からも電子のオーバーフローが問題となっており、従来の短波長の半導体レーザにおいては、オーバーフロー防止層或いはキャリアストッパ層を設けているが、それでも、しきい値キャリア密度 N_{th} が高いのでオーバーフローが起きやすいという問題があり、この様にナイトライド系半導体においては、他の半導体よりも電子のオーバーフローが本質的な問題となる。

【0048】即ち、半導体レーザのしきい値電流密度 J_{th} は、 τ_s を電子のライフタイム、 d を活性層の厚さ、 e を素電荷、 N_{th} をしきい値キャリア密度とした場合、 $J_{th} = N_{th} \cdot d \cdot e / \tau_s$ で表され、しきい値フェルミ準位 $E_{F_{th}}$ は、キャリア密度 N に依存するフェルミ準位 E_F のしきい値キャリア密度 N_{th} における値、即ち、 $E_{F_{th}} = E_F(N_{th})$ で表される。

【0049】このしきい値キャリア密度 N_{th} は、キャリア密度 N の関数である G_m (modal gain: モード利得) がキャビティ・ロスを上回ってレーザ発振を開始するキャリア密度であり、しきい値キャリア密度 N_{th} を小さくするためには G_m を大きくする必要がある。

【0050】この G_m は Γ を光閉じ込め係数とし、 G を活性層の組成及びキャリア密度等で決まる利得とすると、

$$G_m = \Gamma \cdot G$$

で表されるので、活性層の厚さが薄くなり、且つ、光閉じ込めが不十分であれば G_m が小さくなり、それに伴ってしきい値キャリア密度 N_{th} も大きくなり、したがって、しきい値フェルミ準位 $E_{F_{th}}$ が上がりやすくなる。このしきい値フェルミ準位 $E_{F_{th}}$ も大きくなると、高エネルギー状態の電子の数が多くなるので、この点からも電子のオーバーフローが問題となる。

【0051】また、有効質量が大きいことが主な原因で、オーバーフロー防止層を設けない場合、p型クラッド層への電子のオーバーフローによるリーク電流が非常に大きいことを本発明者等はシミュレーションにより見出したのでこの事情を図40を参照して説明する。

図40参照

図40は、 $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ からなる5層のウェル層を $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ バリア層で挟んだMQW構造短波長半導体レーザにおける、電子のオーバーフロー電流の

総電流量依存性のシミュレーション結果を、 $AlGaIn$ クラッド層の Al 組成を変化させて示したものであり、クラッド層の Al 組成比が0.05の場合、即ち、 $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ 層を用いた場合には、低電流領域からリーク電流が増加しはじまり、 $20kA/cm^2$ の時に、総電流量の半分以上がリークすることが分かる。

【0052】この様なリーク電流は、レーザ発振に寄与しない無効電流であり、これ自体がしきい値電流密度 J_{th} の増加につながるばかりか発熱の原因ともなって、より一層レーザ発振を困難にするものである。

【0053】クラッド層として Al 組成比が0.05の $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ 層を用いた場合には、活性層との禁制帯幅の差は500meVもあり、従来の材料系では十分な差であるが、ナイトライド系においてはこの様にオーバーフロー電流が無視できない大きさになるため、オーバーフローによるリーク電流を低減するために、クラッド層の Al 組成比を大きくした $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 層等が用いられている。

【0054】また、本発明者は、オーバーフロー電流は素子温度にも依存することをシミュレーションにより見出したのでこの事情を図41を参照して説明する。

図41参照

図41は、 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ クラッド層を用いた場合の電子のオーバーフロー電流の総電流量依存性のシミュレーション結果を、素子温度を変化させて示したものであり、図から明らかなように、素子温度が上昇すると高電流領域でオーバーフローが増加することが分かる。

【0055】そして、実際の素子では、オーバーフローした電流がp側電極まで達して発熱して素子温度を上昇させることになり、この素子温度の上昇によって更にオーバーフロー電流が増加するという悪循環が生じ、レーザ発振を阻害するものと考えられる。

【0056】一方、電子のオーバーフローを防止するために、p型 $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 層或いは $Al_{0.18}Ga_{0.82}N$ 層等のオーバーフロー防止層を設けた場合、この $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 層或いは $Al_{0.18}Ga_{0.82}N$ 層はp側光ガイド層より屈折率が低いので、レーザ発振を得るために必要な光閉じ込めが大きく減少してしまう問題があり、且つ、ヘテロ接合界面にエネルギースパイクを形成して正孔の注入に対するバリアとなる問題がある。

【0057】また、上述の図32に示す様に、ナイトライド系化合物半導体を用いた従来のMQW半導体レーザにおいて、MQW活性層836とp型 GaN 光ガイド層838との間に、禁制帯幅の大きなp型 $Al_{0.18}Ga_{0.82}N$ オーバーフロー防止層837を設けた場合には、内部ロスの増加を助長すると共にホールに対する電位障壁を大きくし駆動電圧を上昇させるという問題があり、また、電子親和力の差に起因する電位障壁によっても駆動電圧が上昇するという問題があるので、この事情を図42を参照して説明する。

【0058】図42(a)参照

図42(a)は従来の短波長半導体レーザのバンドダイヤグラムであり、図から明らかなように、p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層837の禁制帯幅が大きいため、p型 GaN 光ガイド層838との間に形成される障壁、即ち、実線で示す電圧非印加時の価電子帯のバンド端と破線で示す電圧印加時の価電子帯のバンド端844との間のエネルギー差が大きくなり、したがって、MQW活性層836へのホールの注入のための印加電圧 V を増大させることになる。

【0059】図42(b)参照

図42(b)は、p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層837の近傍における価電子帯側のバンドダイヤグラムを模式的に示す図であり、図に示すように、MQW活性層836とp型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層837との界面、及び、p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層837とp型 GaN 光ガイド層838との界面に電子親和力の差に起因してノッチ845、846が形成され、このノッチ845、846がホールの注入に対する電位障壁となり、ホールの注入効率が低下することになる。

【0060】また、このオーバーフローを助長する他の要因としては、p型クラッド層の比抵抗が高いこと、及び、p型クラッド層における非発光寿命が短いことが挙げられ、これらの要因は本質的なものではないため、これらを改善することによってオーバーフローを低減することも考えられる。

【0061】しかし、現状では十分な結晶品質を有するp型クラッド層が得られておらず、例えば、比抵抗に関しては、p型クラッド層に対するドーピングが難しく、十分でないことが原因であるが、 Al 組成比の増加とともにドーピングが一層困難になるので、オーバーフローを低減するために Al 組成比の大きなp型クラッド層を使用した場合に、その比抵抗を低下させることは容易ではない。

【0062】また、非発光寿命に関しても、アンドープの結晶でも非発光寿命が1ns(ナノ秒)程度と従来材料より短く、p型ドーピング層に至っては0.1ns以下と考えられ、現実的には改善が難しいという問題がある。

【0063】即ち、ナイトライド系化合物半導体の結晶品質上の特徴としては、転位密度が非常に高いことが挙げられ、特に、成長基板としてサファイア基板を用いた場合には、成長層と十分格子整合しないため、成長層の結晶性が悪く、例えば、通常の転位密度は 10^{10}cm^{-2} に達することが報告されており、また、非発光寿命が1ns(ナノ秒)程度と非常に速いという問題がある。

【0064】また、p型不純物のドーピングによって、p側光ガイド層の結晶性が劣化し、非発光寿命はさらに短く0.1ns(=100ps)程度となり、非発光性

再結合の量が増大することになり、レーザ発振のためのしきい値電流密度 J_{th} がさらに増大することになる。

【0065】このため、 Mg をドーピングしてもホール濃度を上げることが容易ではないナイトライド系半導体において、p側光ガイド層のホール濃度を上げることによる効果より、p型ドーピングに伴う移動度の低下や、結晶性の劣化の方が問題になるものと考えられる。

【0066】一方、転位密度に関しては、 10^{10}cm^{-2} の値は、転位密度が 10^4cm^{-2} 以下である従来の閃亜鉛鉱型結晶構造半導体の約100万倍であるが、この様なナイトライド系化合物半導体においては、転位は非発光中心を形成しないのでデバイスの特性には影響しないと言われており、したがって、非発光中心を低減するために転位密度を低減する必要はないので、この様な高密度の転位密度が存在したままで半導体レーザが実現されている。

【0067】また、ナイトライド系半導体レーザの活性層として通常用いられている InGaN は、上記のナイトライド系化合物半導体に共通する物性的特徴の他に、従来材料と全く異なる性質を有している。即ち、 InGaN は InN と GaN との混晶であるが、 InN の禁制帯幅が1.9eVであるのに対して GaN の禁制帯幅は3.4eVと非常に大きく異なり、また、結晶成長温度も InN が600℃前後であるのに対して、 GaN が1000℃前後と大きく異なっている。

【0068】これらのことが原因で、この InGaN 混晶は非常に混ざりにくいたことが知られており、非混晶領域が大きく、且つ、 In 組成比が0.2以下と小さい領域においても、 In 組成比の増加に伴い組成分離している割合が大きくなるという問題がある。

【0069】この結果、 In 組成比が0.15程度の InGaN 層において、200 μm 程度のマクロな領域で見たフォトルミネッセンス(PL)スペクトルの半値幅は、組成分離による結晶内不均一を反映して非常に大きく、良い結晶でも150meVである。

【0070】このことは、従来の閃亜鉛鉱型結晶構造の半導体では薄膜化すれば大きくなるはずのPLスペクトルの半値幅が InGaN 混晶では逆に小さくなり、この現象が、極低温に冷却しても半値幅の変化は殆どないという、従来の材料とは全く異なる性質の原因である。

【0071】これらの InGaN における特徴は、サファイア基板、 SiC 基板、或いは、スピネル基板等の成長基板として用いる基板の種類に依存せず、また、減圧MOVPE法(減圧有機金属気相成長法)、常圧MOVPE法、或いは、MBE法(分子線エピタキシャル成長法)等の成長方法にも依存せず、さらに、六方晶或いは立方晶等の結晶構造にも依存せずに出現するものであり、この様な本質的な特徴は、ある程度許容すべき、避けられない特殊性であると考えられる。

【0072】この様に、従来の InGaN を活性層とす

る短波長半導体レーザや発光ダイオード(LED)においては、この様な結晶内組成不均一性をそのままにして開発が進められており、LEDでは実際にこの大きな組成不均一性を持ったまま製品化が行われているものと考えられる。

【0073】また、短波長半導体レーザにおいても、上述の様にレーザ発振には成功しているものの、これまでは適当な評価手段がなかったため、実際の短波長半導体レーザにおいて、レーザ共振器全体でどの程度の組成不均一が生じているのかは分からず、且つ、この様な組成不均一がデバイス特性にどのような影響を及ぼすかは知られておらず、したがって、レーザ発振に必要な結晶品質がどの程度のものであり、且つ、この様な品質の結晶をどのような条件で成長した場合に再現性良く得られるかは全く未知であった。

【0074】そこで、本発明者等は、最近、短波長半導体レーザの活性層となるInGa_N混晶について、1μmという微小スポット径でフォトルミネッセンス(PL)測定を行うことにより、InGa_N混晶中の組成不均一の程度を定量的に評価する手法を開発した。

【0075】この様な評価を行った結果、InGa_NMQW(多重量子井戸)活性層のPLピーク波長が、結晶内で非常に大きな分布を有することが判明したので、図43及び図44を参照して説明する。なお、この測定を行った従来の短波長半導体レーザの詳細については未発表である。

【0076】図43(a)参照

図43(a)は、レーザ発振しなかった素子において、10000μm²の領域内でPLスペクトルを2μmおきに2500点測定した場合の、各測定点におけるPLピーク波長とPL光強度の相関を示すものであり、396nm(≒3.131eV)から416nm(≒2.980eV)の範囲に渡って、PLピーク波長、PL光強度ともに大きく分布し、PLピーク波長分布範囲は151meV、即ち、約150meVであった。

【0077】因に、光通信用半導体レーザとして用いられているInGaAs系の活性層について同様の評価を行った結果、PLピーク波長分布が5meV程度の分布、即ち、InGa_N混晶の1/30程度の分布しか持っていなかったことが判明し、この結果からもInGa_N系が非常に特殊な材料系であり、従来の常識が通用しないことが分かる。

【0078】このInGa_N系半導体レーザにおいては、物性上の理由からしきい値電流密度 J_{th} が本質的に高い上、この様な活性層の組成不均一の大きさはレーザ発振を達成する上で致命的な欠点となるものであり、上述の評価からは、PLピーク波長分布が150meV以上の場合にはレーザ発振しないという結果が得られている。

【0079】図43(b)参照

図43(b)は、レーザ発振した素子において、10000μm²の領域内でPLスペクトルを2μmおきに2500点測定した場合の、各測定点におけるPLピーク波長とPL光強度の相関を示すものであり、PLピーク波長分布範囲は400nm(≒3.100eV)から412nm(≒3.009eV)の範囲に渡って、91meV、即ち、約90meVであり、且つ、PL光強度分布も小さいものであった。

【0080】図44(a)参照

図44(a)は、上記の様なPLピーク波長分布を有するInGa_N系半導体レーザの電流-光出力特性(I-L特性)を示す図であり、414.3nmの波長において、室温パルス発振が達成されたが、電流を増大するにつれて明確にキンクが現れている。なお、PL波長とレーザ発振波長とは互いに若干異なるものである。

【0081】図44(b)参照

図44(b)は、図44(a)と同じInGa_N系半導体レーザに、しきい値電流密度 J_{th} の1.1倍、1.2倍、或いは、1.3倍の電流を流した場合の発振波長を表すもので、電流が多くなるにしたがって多波長発振が起こっており、この多波長発振が図44(a)におけるI-L特性におけるキンクの原因となっていることが分かる。

【0082】従来、InGa_N系半導体レーザにおいては、発振波長が多波長であったり、或いは、注入電流によって大きく変化することが知られており、これは、活性層内における量子ドット(量子箱)化が反映しているものと考えられていた。即ち、従来においては、多波長発振が量子効果に起因すると考えられており(必要ならば、Japanese Journal of Applied Physics, vol. 35, 1996, p. 217参照)、実際に、InGa_N層中に量子ドットが存在することが報告(必要ならば、Applied Physics Letters, vol. 70, 1997, p. 981参照)されている。

【0083】しかし、本発明者の研究の結果、上述の様に活性層内における組成不均一性に起因するPLピーク波長の空間的分布が多波長発振の原因であると考えられるに至ったので、この事情を図45を参照して説明する。

【0084】図45参照

図45の棒グラフは、図43(b)に示した測定結果におけるPLピーク波長のヒストグラムであり、一方、折れ線グラフは図34に示したように実際にレーザ発振した半導体レーザについて光励起による発振スペクトルの強度分布を示したもので、両者を重ね合わせると、非常に良い一致が得られ、このことから、多波長発振はPLピーク波長分布、即ち、活性層内の組成不均一が原因であると考えられる。

【0085】そして、この様な多波長発振は、しきい値

電流密度 J_{th} を増加させるばかりか、I-L特性におけるキック、近視野像及び遠視野像の劣化等の光学特性の劣化にもつながるため、光学装置用光源としても InGaAsN 系半導体レーザにおいては、活性層の組成分布を抑制することが重要になる。

【0086】この様に、本発明者等の実験の結果、レーザ発振のためには 150 meV 以下の PL ピーク波長分布、即ち、In 組成比において ± 0.03 の分布範囲内になるように設定することが必要であることが判明し、また、多波長発振を抑制するためには、PL ピーク波長分布を 90 meV 以下に、即ち、In 組成比において ± 0.018 以下にすることが必要であることが判明し、好適には 50 meV 以下、さらに、より好適には、20 meV 以下にすることが望ましい。

【0087】さらに、上記の図 31 (b) の短波長半導体発光素子は本質的に発光ダイオードであるため、不純物濃度或いは層厚についての記載はあるものの、半導体レーザにした場合には、どの様な条件で効率の良い、低しきい値電流密度でのレーザ発振が生ずるかについては何ら示唆するところがないものである。

【0088】したがって、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた短波長半導体レーザのしきい値電流密度を低減することを目的とする。

【0089】

【課題を解決するための手段】ここで、課題を解決するための手段を説明するが、図 1 は請求項 1 乃至 7 に関する原理的構成の説明図であり、また、図 2 は量子井戸構造半導体レーザにおけるモード利得の電流密度の井戸層の層数依存性を示す図である。

図 1 参照

(1) 本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層 4 を厚さが 3 nm 以上の単一の利得層で構成すると共に、活性層 4 とクラッド層 2、6 との間に光ガイド層 3、5 を設けることを特徴とする。

【0090】この様に、従来の常識に反して活性層 4 を単一の利得層、即ち、量子井戸構造が形成される場合には単一の井戸層、形成されない場合には単一の活性層とすることによって、注入電流を有効活用することによってしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、また、3 nm 未満の厚さでは光閉じ込め係数 Γ が小さくなってしきい値電流密度 J_{th} が大きくなるので、活性層 4 の厚さを 3 nm 以上にすることが必要である。

【0091】図 2 参照

例えば、キャビティロスが 100 cm^{-1} と小さい場合には、モード利得 G_m がキャビティロスを上回ってレーザ発振を開始するしきい値電流密度 J_{th} は、 $J_{th}(1 \text{ 層}) < J_{th}(2 \text{ 層}) < J_{th}(3 \text{ 層}) < J_{th}(4 \text{ 層}) < J_{th}(5 \text{ 層})$ となり、利得層の総層厚が同じ場合、活性層 4 を単一の利得層で構成した方がしきい値電流密度 J_{th}

を低くすることができる。

【0092】また、活性層 4 とクラッド層 2、6、即ち、障壁層との間に、光ガイド層 3、5、即ち、SCH (Separate Confinement Heterostructure) 層を設けることによって、光閉じ込め係数 Γ を大きくすることができ、それによってしきい値フェルミ準位 E_{th}^F を下げることができるので、しきい値電流密度 J_{th} が低減され、さらに、電子のオーバーフローも少なくなり、効率が向上する。

【0093】(2) また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層 4 を厚さが 3 nm 以上の単一の利得層で構成すると共に、活性層 4 をアンドープ層としたことを特徴とする。

【0094】この様に、活性層 4 をアンドープ層とすることによって、不純物散乱を少なくして正孔の移動度を高めることができ、それによって、正孔をより均一に注入することができる。

【0095】(3) また、本発明は、上記 (2) において、アンドープ層の不純物濃度が、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であることを特徴とする。

【0096】アンドープ層の場合、不可避的に不純物がオートドープされることがあるので、結果的な不純物濃度としては、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であれば良い。

【0097】(4) また、本発明は、上記 (1) または (2) において、利得層の厚さが 6 nm 以上であることを特徴とする。

【0098】 $J_{th} = N_{th} \cdot d \cdot e / \tau$ で決められるしきい値電流密度 J_{th} は、利得層の厚さが 6 nm 以上の場合に上昇するが、実際には、利得層の厚さの増加に伴ってモード利得 G_m が増加し、しきい値フェルミ準位 E_{th}^F を下げることによってオーバーフロー電流を減少することができ、それによって、トータルとしてのしきい値電流は減少するので、利得層の厚さは 6 nm 以上が望ましい。

【0099】(5) また、本発明は、上記 (1) 乃至 (4) のいずれかにおいて、利得層の厚さを 30 nm 以下にしたことを特徴とする。

【0100】この様に、利得層の厚さの増加に伴ってモード利得 G_m は増加するが、しきい値電流密度 J_{th} は $J_{th} = N_{th} \cdot d \cdot e / \tau$ に依存するので、注入された電流を有効に活用できる利得層の厚さの上限は 30 nm であり、利得層の厚さは 3 ~ 30 nm に設定すれば良い。

【0101】(6) また、本発明は、上記 (5) において、利得層の厚さを 10 nm 未満にしたことを特徴とする。

【0102】上述の様に、利得層の厚さの増加によるしきい値電流密度 J_{th} の増加と、しきい値フェルミ準位 E_{th}^F の低下はトレードオフの関係にあるので、利得層の厚さ d は 30 nm 以下が良いが、より好適には、10 nm 未満、即ち、 $3 \text{ nm} \leq d < 10 \text{ nm}$ の厚さに設定する

ことが望まれる。

【0103】(7)また、本発明は、上記(1)乃至(6)のいずれかにおいて、利得層と光ガイド層3、5との間にバリア層を設けて単一量子井戸構造を構成することを特徴とする。

【0104】この様に、利得層の両側にバリア層を設けることにより、光ガイド層3、5のバンド構造とは無関係に利得層を井戸層とする単一量子井戸構造を構成することができ、キャリアの注入効率を高めるためには、バリア層の禁制帯幅を光ガイド層3、5の禁制帯幅より小さくすれば良く、キャリアの閉じ込めを重点に考える場合には、バリア層の禁制帯幅を光ガイド層3、5の禁制帯幅より大きくすれば良い。

【0105】(8)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層4を2層の利得層を有する多重量子井戸構造で構成することを特徴とする。

【0106】レーザのキャビティロス(しきい値利得)が大きい場合には、上述の図2及び図36から明らかな様に、利得層を2層にした場合に、しきい値電流密度 J_{th} をより低くすることができる。

【0107】(9)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層4を1層の厚さが6nm以上の2層または3層の利得層を有する多重量子井戸構造で構成することを特徴とする。

【0108】再び、図2参照

例えば、キャビティロスが 200 cm^{-1} と大きくなった場合には、モード利得 G_m がキャビティロスを上回ってレーザ発振を開始するしきい値電流密度 J_{th} は、

$J_{th}(2\text{層}) < J_{th}(3\text{層}) \approx J_{th}(1\text{層}) < J_{th}(4\text{層}) < J_{th}(5\text{層})$

となり、利得層の総層厚が同じ場合、利得層が2層又は3層でなる多重量子井戸構造を構成した方がしきい値電流密度 J_{th} を低くすることができる。

【0109】(10)また、本発明は、上記(8)または(9)において、利得層をアンドープ層で構成することを特徴とする。

【0110】この様に、多重量子井戸構造活性層を用いた場合にも、利得層をアンドープ層にして、不純物散乱を少なくして正孔の移動度を高めることが望ましく、それによって、正孔をより均一に注入することができる。

【0111】(11)また、本発明は、上記(1)乃至(10)のいずれかにおいて、利得層4が、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{N}$ (但し、 $0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$)で構成されることを特徴とする。

【0112】この様な、短波長半導体レーザを構成する利得層としては、 GaN 、 InGaIn 、 AlGaIn 、或いは、 AlInGaIn 等のナイトライド系化合物半導体、即ち、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{N}$ (但し、 $0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$)が好適である。

【0113】(12)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層として多重量子井戸構造を用いると共に、放射光強度分布の最大位置を活性層の中心位置よりp型クラッド層側にずれていることを特徴とする。

【0114】この様に、放射光強度分布の最大位置を活性層の中心位置よりp型クラッド層側にずらすことにより、最大光学利得位置と放射光強度分布の最大位置とが一致し、光閉じ込め効果が高まるので、しきい値電流密度 J_{th} を低減することができる。

【0115】(13)また、本発明は、上記(12)において、放射光強度分布の最大位置が多重量子井戸構造のp型クラッド層側から第1番目の量子井戸の位置に一致していることを特徴とする。

【0116】ナイトライド系化合物半導体を用いたMQW構造半導体レーザにおいては、最大光学利得位置は、p型クラッド層側から第1番目の量子井戸であるので、この量子井戸の位置に放射光強度分布の最大位置を合わせることが望ましい。

【0117】(14)また、本発明は、上記(12)または(13)において、活性層とn型クラッド層及びp型クラッド層との間に、それぞれn側光ガイド層及びp側光ガイド層を設けると共に、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする。

【0118】ナイトライド系化合物半導体においては禁制帯幅が大きいほど屈折率が小さくなるので、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることによって放射光強度分布はp側に移動する。

【0119】(15)また、本発明は、上記(12)乃至(14)のいずれかにおいて、活性層とn型クラッド層及びp型クラッド層との間に、それぞれn側光ガイド層及びp側光ガイド層を設けると共に、p側光ガイド層の層厚をn型光ガイド層の層厚より厚くすることを特徴とする。

【0120】この様な光ガイド構造の非対称性は光ガイド層、即ち、SCH層の厚さを非対称にすることによっても形成することができ、p側光ガイド層の層厚をn側光ガイド層の層厚より厚くすることによっても放射光強度分布はp側に移動する。

【0121】(16)また、本発明は、上記(12)乃至(15)のいずれかにおいて、n型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする。

【0122】この様に、n型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることによっても、放射光強度分布をp側に移動することができる。なお、この場合、n側光ガイド層の禁制帯幅もp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくしても良いし、光ガイド層の層厚を非対称にしても良い。

【0123】(17)また、本発明は、活性層として単一量子井戸構造を用いると共に、活性層とp側光ガイド層との間に広禁制帯幅層を設けたナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、広禁制帯幅層に起因する放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とのずれをn側層により補償することを特徴とする。

【0124】電子のオーバーフロー防止のために、活性層とp側光ガイド層との間に広禁制帯幅層を設けた場合には、広禁制帯幅層に起因して放射光強度分布の最大位置が活性層の中心位置からn側にずれることになるが、n側層の禁制帯幅を大きくすることによってずれを補償することができ、それによって放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とを略一致させることができる。

【0125】(18)また、本発明は、上記(17)において、n側層が少なくともn側光ガイド層であり、このn側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする。

【0126】この様に、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることによって、放射光強度分布をp側に移動することができ、それによって放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とを略一致させることができる。

【0127】(19)また、本発明は、上記(17)または(18)において、n側層が少なくともn側光ガイド層であり、このn側光ガイド層の層厚をp側光ガイド層の層厚より薄くすることを特徴とする。

【0128】この様に、n側光ガイド層の層厚をp側光ガイド層の層厚より薄くすることによって非対称性を導入しても良く、それによって、放射光強度分布をp側に移動させて放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とを略一致させることができる。

【0129】(20)また、本発明は、上記(17)乃至(19)のいずれかにおいて、n側層が少なくともn型クラッド層であり、このn型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることを特徴とする。

【0130】この様に、n型クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることによって、放射光強度分布をp側に移動することができ、それによって放射光強度分布の最大位置と活性層の中心位置とを略一致させることができる。なお、この場合も、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくしても良いし、或いは、光ガイド層の層厚を非対称にしても良い。

【0131】(21)また、本発明は、上記(12)乃至(20)のいずれかにおいて、量子井戸構造の活性層を構成する井戸層が、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ (但し、 $0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) で構成されることを特徴とする。

【0132】この様な、短波長半導体レーザにおける量

子井戸構造の活性層を構成する井戸層としては、 GaN 、 InGaN 、 AlGaIn 、或いは、 AlInGaIn 等のナイトライド系化合物半導体、即ち、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ (但し、 $0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) が好適である。

【0133】(22)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層が InGaIn 或いは GaIn のいずれかからなり、且つ、p側光ガイド層の不純物濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であることを特徴とする。

【0134】この様に、不純物濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満の InGaIn 或いは GaIn からなるp側光ガイド層を用いることによって、p側光ガイド層におけるホールの移動度を高めることができ、それによって、ホールの注入効率を高めることができ、また、結晶性を改善することができるので、非発光性再結合を低減し、それによって、しきい値電流密度 J_{th} を低くすることができる。

【0135】(23)また、本発明は、上記(22)において、p側光ガイド層がアンドープ層であることを特徴とする。

【0136】この様な低不純物濃度層は、アンドープ層で構成することが望ましい。

【0137】(24)また、本発明は、上記(22)または(23)において、p側光ガイド層におけるホールの移動度が、 $2 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 以上であることを特徴とする。

【0138】この様な低不純物濃度層におけるホールの移動度は、所要のホールの注入が得られ、且つ、現在の時点において、レーザ発振が可能になると考えられる $2 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 以上とすることが必要である。

【0139】(25)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の層厚をn側光ガイド層の層厚より薄くしたことを特徴とする。

【0140】この様に、p側光ガイド層の層厚をn側光ガイド層の層厚より薄くすることによって、p側光ガイド層における非発光性再結合を低減することができ、それによって、低しきい値電流密度 J_{th} の半導体レーザを構成することができる。

【0141】(26)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の層厚が $0.1 \mu\text{m}$ 未満であることを特徴とする。

【0142】この様に、p側光ガイド層の層厚を $0.1 \mu\text{m}$ 未満に、より好適には、 $0.08 \mu\text{m}$ (80 nm) 以下にすることによって、p側光ガイド層における非発光性再結合を効果的に低減することができる。

【0143】(27)また、本発明は、上記(25)または(26)において、p側光ガイド層の禁制帯幅をn側光ガイド層の禁制帯幅より大きくしたことを特徴とす

る。

【0144】この様に、p側光ガイド層の禁制帯幅をn側光ガイド層の禁制帯幅より大きくすることによって、電子がp側光ガイド層側へオーバーフローするのを防止することができる。

【0145】(28)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の禁制帯幅が活性層に隣接する部分で小さく、且つ、p型クラッド層に隣接する部分で大きくなっていることを特徴とする。

【0146】この様に、禁制帯幅が活性層に隣接する部分で小さく、且つ、p型クラッド層に隣接する部分で大きくなっているp側光ガイド層を用いることによって、十分な光閉じ込めを確保しつつ、電子のp型クラッド層へのオーバーフローを防止することができ、また、活性層へのホールの注入効率を改善することができる。

【0147】(29)また、本発明は、上記(28)において、p側光ガイド層の禁制帯幅が階段的に変化していることを特徴とする。

【0148】上記(28)の様なp側光ガイド層における禁制帯幅の変化は、階段的变化、即ち、ステップ状の変化であっても良く、2層、或いは、2層以上の多層構造で構成すれば良い。

【0149】(30)また、本発明は、上記(28)において、p側光ガイド層の禁制帯幅が連続的に変化していることを特徴とする。

【0150】また、上記(28)の様なp側光ガイド層における禁制帯幅の変化は、連続的变化、即ち、グレーデッド状の変化であっても良い。

【0151】(31)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p側光ガイド層の禁制帯幅が活性層に隣接する側からp型クラッド層に隣接する側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする。

【0152】この様に、禁制帯幅が活性層に隣接する側からp型クラッド層に隣接する側に向かって連続的に小さくなっているp側光ガイド層、即ち、逆グレーデッド状のp側光ガイド層を用いることによって、ホールの注入に障害となるエネルギースパイクが発生することがなく、十分なホールの注入を確保しつつ、電子のオーバーフローを防止することができる。

【0153】(32)また、本発明は、上記(28)乃至(31)のいずれかにおいて、p側光ガイド層を構成する禁制帯幅の小さな層がInGa_xN_{1-x}或いはGa_{1-x}N_xからなり、且つ、禁制帯幅の大きな層がAlGa_xN_{1-x}からなることを特徴とする。

【0154】この様に、電子のオーバーフローを効果的に防止するためには、Ga_{1-x}N_x/AlGa_xN_{1-x}又はInGa_xN_{1-x}/AlGa_xN_{1-x}界面における $\Delta E_c / \Delta E_v$ が大きいので、禁制帯幅の大きな層としてAlGa_xN_{1-x}を採用するこ

とが望ましい。

【0155】(33)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子において、共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が90meV以下であることを特徴とする。

【0156】(34)また、本発明は、上記(33)において、共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が50meV以下であることを特徴とする。

【0157】この様に、短波長半導体レーザにおいて、多波長発振を抑制するためには、共振器内の活性層のフォトルミネッセンス波長の分布が90meV以下であることが必要であり、より好適には、50meV以下にすることが望ましい。

【0158】(35)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子において、共振器内の活性層の転位密度を 10^9 cm^{-2} 以下とすることを特徴とする。

【0159】(36)また、本発明は、上記(35)において、共振器内の活性層の転位密度を 10^8 cm^{-2} 以下とすることを特徴とする。

【0160】従来の短波長半導体レーザにおける転位密度は 10^9 cm^{-2} 台、即ち、 $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ であり、PLピーク波長の不均一の大きさは転位の間隔と一致することから、共振器内の活性層の転位密度を低減することによってPLピーク波長の分布を低減することができ、そのためには、共振器内の活性層の転位密度を 10^9 cm^{-2} 以下とすることが必要であり、好適には、 10^8 cm^{-2} 以下、より好適には、 10^7 cm^{-2} 以下にすることが望ましい。

【0161】即ち、従来の短波長半導体レーザにおいては、ナイトライド系化合物半導体との格子不整合が13%程度と非常に大きなサファイアを成長基板として用いていたため、共振器内の活性層の転位密度は 10^{10} cm^{-2} 程度であるが、ナイトライド系化合物半導体においては、転位は非発光中心を形成しないのでデバイスの特性には影響しないと言われているので、この様な転位密度を全く問題にせずにデバイス化が進められていたが、上述の様に、転位密度と組成不均一とが相関を示し、転位密度が小さくなると組成不均一も小さくなるので、格子不整合が3%と大幅に低減されるSiC基板を用いることにより、転位密度を 10^9 cm^{-2} 以下に、少なくとも、 10^7 cm^{-2} 程度までは低減することができ、それによって、多波長発振の抑制された短波長半導体発光素子を実現することができる。

【0162】(37)また、本発明は、上記(33)乃至(36)のいずれかにおいて、活性層がInを構成要素として含むことを特徴とする。

【0163】この様に、活性層としてInを構成要素として含む半導体を用いた場合、特に、In組成比の比較的大きなInGa_xN_{1-x}を用いた場合にも、上記(33)乃至

至(36)の条件を満たすことによって、青色発光素子、特に、青色半導体レーザとして好適な結晶性の良好な活性層を得ることができる。

【0164】(38)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体発光素子の製造方法において、活性層を成長させる際の成長速度を $0.1\mu\text{m}/\text{時}$ 以上とすることを特徴とする。

【0165】ナイトライド系化合物半導体においては、活性層を成長させる際の成長速度を $0.1\mu\text{m}/\text{時}$ ($0.1\mu\text{m}/\text{h}$)以下とした場合には、PL波長分布、即ち、PL波長の標準偏差が大きくなり、特に、成長速度 r_g が $0.075\mu\text{m}/\text{h}$ の場合には、 InGaIn 混晶の In 組成比が大きくなるとPL波長の標準偏差が大きくなり、レーザ発振が不可能になる。

【0166】したがって、 $0.1\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の成長速度を採用することにより、PLピーク波長分布を 90meV 以下とすることができるので、多波長発振の抑制された半導体レーザを再現性良く製造することができ、また、LEDとしても波長の半値幅の狭い純度の高い青色発光素子を実現することができる。

【0167】(39)また、本発明は、上記(38)において、成長速度を $0.2\mu\text{m}/\text{時}$ 以上としたことを特徴とする。

【0168】この様に、成長速度を上げることによって、PLピーク波長分布をより狭くすることができ、多波長発振の抑制が容易になる。

【0169】(40)また、本発明は、上記(38)において、成長速度を $0.3\mu\text{m}/\text{時}$ 以上としたことを特徴とする。

【0170】この様に、成長速度を $0.3\mu\text{m}/\text{時}$ 以上とした場合には、青色発光素子として好適な In 組成比の比較的大きな InGaIn を成長させる場合にもPL波長の標準偏差の増大が起こらず、再現良くPLピーク波長分布の狭い、例えば、 90meV 以下の活性層を成長させることができ、且つ、PL光強度の大きな結晶性の良好な活性層を成長させることができる。

【0171】(41)また、本発明は、上記(38)乃至(40)のいずれかにおいて、基板としてSiC基板を用いると共に、SiC基板の表面をエッチングすることを特徴とする。

【0172】活性層の転位密度、したがって、組成不均一によるフォトルミネッセンス波長の分布は基板の表面欠陥密度に依存するので、格子不整合の小さなSiC基板を用いた場合にも、その表面をエッチング、特に、ドライ・エッチングすることにより表面欠陥を除去することにより、転位密度の小さな活性層を再現性良く成長させることができる。

【0173】(42)また、本発明は、上記(38)乃至(41)のいずれかにおいて、活性層が In を構成要素として含むことを特徴とする。

【0174】上記(40)において説明したように、本発明の製造方法は、 In を構成要素として含む活性層を有する半導体発光素子に特に有効である。

【0175】(43)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、p型クラッド層を、2層の広禁制帯幅のp型半導体層の間に、狭禁制帯幅の中間層を挟んだ多層構造で構成することを特徴とする。

【0176】この様に、p型クラッド層の間に狭禁制帯幅の中間層を挟み込むことによって、この中間層においてオーバーフローしてきた電子を再結合発光させ、光として放出することによって、オーバーフロー電流に起因する発熱を抑制することができ、それによって、オーバーフロー電流が増加する悪循環を断ち切ることができ、しきい値電流密度 J_{th} を低減することができる。

【0177】(44)また、本発明は、上記(43)において、中間層が、単層の狭禁制帯幅層で構成されることを特徴とする。

【0178】この様な中間層は、単層の狭禁制帯幅層で構成しても良く、この場合には、p型クラッド層の抵抗を小さくするために、p型にドーピングすることが望ましい。

【0179】(45)また、本発明は、上記(43)において、中間層が、2層の広禁制帯幅のp型半導体層の間の任意の位置で禁制帯幅が最低になるように禁制帯幅が連続的に変化していることを特徴とする。

【0180】この様に、中間層を、U字型の禁制帯幅分布を有する層で構成することによって、ホール側のp側光ガイド層への注入をスムーズに行うことができる。

【0181】(46)また、本発明は、上記(43)において、中間層が、広禁制帯幅の層と狭禁制帯幅の層を交互に複数層積層させた多層構造からなることを特徴とする。

【0182】この様に、中間層を、多層構造で構成しても良く、この場合には、狭禁制帯幅の層をアンドープにすることによって結晶性を改善し、狭禁制帯幅の層における発光性再結合確率を大きくすることができる。

【0183】(47)また、本発明は、上記(46)において、中間層を構成する広禁制帯幅の層と狭禁制帯幅の層との間の禁制帯幅が連続的に変化していることを特徴とする。

【0184】この様に、中間層を構成する広禁制帯幅の層と狭禁制帯幅の層との間の禁制帯幅を連続的に変化させることによって、ホール側のp側光ガイド層への注入をスムーズに行うことができる。

【0185】(48)また、本発明は、上記(43)乃至(47)のいずれかにおいて、中間層の内の狭禁制帯幅側の層の少なくとも一部をアンドープ層にしたことを特徴とする。

【0186】この様に、中間層の内の狭禁制帯幅側の層

の少なくとも一部をアンドープ層にすることによって結晶性を改善し、発光性再結合確率を大きくすることができる。

【0187】(49)また、本発明は、上記(43)乃至(48)のいずれかにおいて、広禁制帯幅の層をAlGa_Nで構成するとともに、狭禁制帯幅の層をInGa_N、Ga_N、或いは、AlGa_Nのいずれかで構成することを特徴とする。

【0188】この様に、広禁制帯幅の層、即ち、p型半導体層及び中間層を構成する広禁制帯幅の部分とAlGa_Nで構成するとともに、狭禁制帯幅の層をInGa_N、Ga_N、或いは、AlGa_Nのいずれかで構成することが好適である。

【0189】(50)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた多重量子井戸構造半導体レーザにおいて、多重量子井戸活性層を構成するバリア層の厚さを5nm未満とすることを特徴とする。

【0190】この様に、ナイトライド系化合物半導体においては、ウェル層からの波動関数のしみ出しの程度が小さいので、多重量子井戸活性層を構成するバリア層の厚さを薄くしても光学利得の発生は低下の問題は余り大きくならないので、バリア層の厚さを5nm未満としてキャリアの不均一注入を改善することによって、多重量子井戸構造半導体レーザの特性を向上することができる。

【0191】(51)また、本発明は、上記(50)において、多重量子井戸活性層を構成するバリア層が、In組成比が0.04以上のInGa_Nによって構成されることを特徴とする。

【0192】この様に、多重量子井戸活性層を構成するバリア層の厚さを薄くした場合には、歪低減の効果が生じ、結晶性の劣化が少なくなるので、InGa_Nからなるバリア層のIn組成比を0.04以上に大きくすることができ、それによってバリア層の障壁の高さを低くすることができるので、キャリアの不均一注入をより一層改善することができる。

【0193】(52)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層の不純物濃度を、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満とすることを特徴とする。

【0194】(53)また、本発明は、上記(52)において、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層をアンドープ層とすることを特徴とする。

【0195】上記(52)或いは(53)の様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層を不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満の層、特に、アンドープ層で構成することにより、ホールが不純物により散乱されることがないのでホールの実効移動度が向上し、ホールの注入効率が改善され、印加電圧Vを小さくすることができる。

【0196】(54)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のp側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする。

【0197】この様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のp側の領域において、禁制帯幅を徐々に変化させる、即ち、連続的に変化させる、或いは、階段状に変化させることによって、エレクトロンブロック層とp側層、即ち、p側光ガイド層或いはp型クラッド層との間の電子親和力を徐々に変化させることができ、それによって界面において電位障壁となるノッチの発生を抑制することができるので、ホールの注入効率が改善され、印加電圧Vを小さくすることができる。

【0198】(55)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする。

【0199】この様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側の領域において、禁制帯幅を徐々に変化させる、即ち、連続的に変化させる、或いは、階段状に変化させることによって、エレクトロンブロック層と活性層との間の電子親和力を徐々に変化させることができ、それによって界面において電位障壁となるノッチの発生を抑制することができるので、ホールの注入効率が改善され、印加電圧Vを小さくすることができる。

【0200】(56)また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側及びp側の領域において、禁制帯幅が徐々に変化していることを特徴とする。

【0201】この様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のn側及びp側の領域において、禁制帯幅を徐々に変化させる、即ち、連続的に変化させる、或いは、階段状に変化させることによって、エレクトロンブロック層と活性層との間、及び、エレクトロンブロック層とp側層との間の電子親和力を徐々に変化させることができ、それによって両方の界面において電位障壁となるノッチの発生を抑制することができるので、ホールの注入効率が改善され、印加電圧Vを小さくすることができる。

【0202】(57)本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザにおいて、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とすることを特徴とする。

【0203】この様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とすることによって、発光スペクトルの評価から、キャリアのオーバーフローを効果的に抑制することができる。

【0204】この理由は必ずしも明らかではないが、エレクトロンブロック層の価電子帯側に深い不純物準位が高密度に形成され、この不純物準位を介した不純物伝導 (impurity conduction、或いは、hopping conduction) 或いはトンネル伝導によってホールが活性層に注入されるので、ホールの注入効率が改善されるためと考えられる。

【0205】(58) また、本発明は、ナイトライド系化合物半導体を用いた半導体レーザの製造方法において、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層の成長温度を600℃～900℃としたことを特徴とする。

【0206】(59) また、本発明は、上記(58)において、エレクトロンブロック層の成長温度を活性層の成長温度と同じにしたことを特徴とする。

【0207】この様に、エレクトロンブロック層の成長温度を、従来の成長温度である1100℃近傍より低い、活性層の成長温度と同様の600℃～900℃とすることによって、活性層における発光強度を高め、且つ、p型光ガイド層における発光を低減することができる。

【0208】(60) また、本発明は、上記(58)または(59)において、エレクトロンブロック層のMg濃度が $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上になるようにMgをドーピングすることを特徴とする。

【0209】この様に、活性層のp側に設けるエレクトロンブロック層のMg濃度が $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上となるようにMgをドーピングすることによって、発光スペクトルの評価から、キャリアのオーバーフローを効果的に抑制することができる。

【0210】

【発明の実施の形態】ここで、図3乃至図5を参照して、活性層或いは井戸層の厚さを選択することによりしきい値電流密度 J_{th} を低減させる本発明の第1及び第2の実施の形態を説明する。まず、図4を参照して本発明の第1の実施の形態の短波長半導体レーザの具体的構成を説明する前に、図3を参照して本発明の第1の実施の形態におけるしきい値電流密度 J_{th} の活性層の層厚依存性を説明する。

【0211】図3参照

図3は、活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 層を用い、活性層の両側に厚さ0.1μmのGa_{0.15}N光ガイド層を設け、その両側に $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層を設けた場合のしきい値電流密度 J_{th} の活性層の層厚依存性の計算結果を示すものであり、電子のオーバーフローがない場合の理想的な場合の計算結果である。

【0212】図から明らかなように、活性層の厚さが3nm以下では、光閉じ込めが充分でなく光閉じ込め係数 Γ が小さくなるので、しきい値フェルミ準位 $E_{F,th}^*$ が上昇してしきい値電流密度 J_{th} が上昇する。なお、 G_{th} はしきい値利得である。

【0213】一方、膜厚が6nm以上では、 $J_{th} = N_{th} \cdot d \cdot e / \tau_s$ の関係から、しきい値電流密度 J_{th} は上昇するが、実際には、この材料系では電子のオーバーフローが大きいので、膜厚を増加させて光閉じ込めを増加させることでしきい値フェルミ準位 $E_{F,th}^*$ を下げることで、それによって、電子のオーバーフローを低減することができるためしきい値電流密度 J_{th} は低減するので、30nm以下までは注入電流を有効に活用することができ、さらに、10nm未満の厚さすることがより好適である。

【0214】図4参照

次に、図4を参照して本発明の第1の実施の形態の半導体レーザの製造工程を簡単に説明するが、まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板11上に、TMGa(トリメチルガリウム)、TMA1(トリメチルアルミニウム)、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50～300nm、例えば、100nmのAlGa_{0.15}Nバッファ層12を成長させる。

【0215】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスを用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmのGa_{0.15}N中間層13を成長させる。

【0216】引き続き、TMA1、TMGa、アンモニア、ドーパントとして、SiH₄、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層14を成長させる。

【0217】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープGa_{0.15}N光ガイド層15を成長させる。

【0218】引き続き、TEGa(トリエチルガリウム)、TMIn(トリメチルインジウム)、アンモニア、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550～900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3

～30nm、例えば、8nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層からなるSQW活性層16を成長させる。

【0219】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga N 光ガイド層17を成長させる。

【0220】引き続いて、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層18を成長させる。

【0221】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga N コンタクト層19を成長させる。

【0222】次いで、n型SiC基板11の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極20を設けると共に、p型Ga N コンタクト層19上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが10 μm のNi電極21を設け、共振器長Lが700 μm となるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0223】この様に、本発明の第1の実施の形態においては、従来の常識に反して活性層を単一のSQW構造にすることによって注入電流を有効に利用することができ、また、井戸層、即ち、利得層の厚さを8nmにすると共に、光ガイド層を用いることにより光閉じ込め効率を高めることによって、しきい値電流密度 J_{th} を低減することができる。

【0224】即ち、利得層の厚さを8nmとする場合、キャビティロスが小さい場合には、4nmの井戸層を2層設けたMQW構造よりも、8nmの井戸層を設けたSQW構造の方がしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、また、光ガイド層がないと光閉じ込め係数 Γ が小さくなり、光がクラッド層側にしみだしてしきい値電流密度 J_{th} が高くなりすぎる。

【0225】なお、上記の第1の実施の形態の説明においては井戸層、即ち利得層の厚さは8nmであるが、図3に関して説明したように、3nm以上であれば良く、好適には6nm以上が望ましく、一方、注入電流を有効利用するためには30nm以下が好適であり、より好適には10nm未満の範囲が望ましい。

【0226】次に、図5を参照して本発明の第2の実施の形態のMQW構造半導体レーザを説明する。

図5参照

まず、上記の第1の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板11上に、TMGa、TMA1、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50～300nm、例えば、100nmのAlGa N バッファ層12を成長させる。

【0227】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスを用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm のGa N 中間層13を成長させる。

【0228】引き続いて、TMA1、TMGa、アンモニア、ドーパントとして、 SiH_4 、及び、キャリアガスとしての H_2 を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層14を成長させる。

【0229】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープGa N 光ガイド層15を成長させる。

【0230】引き続いて、TEGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしての窒素、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550～900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層と厚さ3～10nm、例えば、8nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を交互にアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が2又は3層、例えば、2層になるように成長させ、MQW活性層22を形成する。

【0231】引き続いて、再び第1の実施の形態と同様

に、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300 nm、例えば、100 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaN光ガイド層17を成長させる。

【0232】引き続いて、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層18を成長させる。

【0233】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNコンタクト層19を成長させる。

【0234】次いで、n型SiC基板11の裏面にはn側電極として厚さ100 nmのNi電極20を設けると共に、p型GaNコンタクト層19上にはp側電極として厚さ100 nm、幅Wが10 μm のNi電極21を設け、共振器長Lが700 μm となるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0235】この様に、本発明の第2の実施の形態においては、活性層を井戸層が2層のMQW構造で構成しているが、上述の図2から明らかなように、キャビティロスが大きい場合には、利得層の総層厚が同じであれば複数の利得層で構成した方がしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、また、前述の図30から明らかなように、井戸層を2乃至3にすることによって、注入電流を有効に利用することができ、それによってもしきい値電流密度 J_{th} を低減することができる。

【0236】例えば、本発明の第2の実施の形態においては、成長基板としてSiCを用いているため、共振器面の形成は容易であるが、上述の図6に示した従来例の様にサファイア基板を用いた場合には、ドライ・エッチングによって共振器面を形成しているためキャビティロスが大きくなるので、この様な場合には、第2の実施の形態の様なMQW構造を用いることが有効となる。

【0237】なお、上記の第2の実施の形態の説明にお

いては、井戸層、即ち、利得層の一層の厚さは8 nmであるが、図3に関して説明したように、6 nm以上であることが好適であり、したがって、6～10 nmの範囲が望ましい。

【0238】以上、本発明の第1及び第2の実施の形態を説明してきたが、本発明は実施の形態に記載した構成に限られるものではなく、その技術思想の範囲において各種の変更が可能であり、例えば、上記の第1及び第2の実施の形態においては、利得層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0239】また、上記の第1及び第2の実施の形態においては、利得層として正孔の移動度を高めるためにアンドープ層を用いているが、アンドープ層の場合、不可避免的に不純物がオートドープされることがあるので、結果的な不純物濃度としては、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であれば良い。

【0240】また、上記の第1の実施の形態においては $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層を用いたSQW構造としているが、バリア層を用いずに、光ガイド層をバリア層として兼用しても良いものである。

【0241】また、上記の第1及び第2の実施の形態においては光ガイド層は単層構造であるが、組成の異なった半導体層を用いて多層構造としても良く、また、グレーデッドバンド・ギャップ層を用いても良い。

【0242】次に、図6乃至図8を参照して、最大発光利得位置と放射強度分布の最大位置とを一致させることによりしきい値電流密度 J_{th} を低減させる本発明の第3乃至第5の実施の形態を説明する。まず、図6を参照して本発明の第3の実施の形態のMQW構造短波長半導体レーザを説明する。

図6参照

まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板111上に、TMGa、TMA1、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50～300 nm、例えば、100 nmの AlGaIn バッファ層112を成長させる。

【0243】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスを用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm 、例えば、0.5 μm のGaN中間

層113を成長させる。

【0244】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、ドーパントとしてSiH₄、及び、キャリアガスとしてのH₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層114を成長させる。

【0245】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層115を成長させる。

【0246】引き続き、TMGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550～900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層と厚さ3～10nm、例えば、8nmのアンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を交互にアンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層が2～10層、例えば、5層になるように成長させ、MQW活性層116を形成する。

【0247】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.15}N光ガイド層117を成長させる。

【0248】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層118を成長させる。

【0249】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ

0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.15}Nコンタクト層119を成長させる。

【0250】次いで、n型SiC基板111の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極120を設けると共に、p型Ga_{0.15}Nコンタクト層119上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが10μmのNi電極121を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってMQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0251】この様に、本発明の第3の実施の形態においては、n側光ガイド層として、p型Ga_{0.15}N光ガイド層117より禁制帯幅の大きなアンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層115を用いているので、n側における屈折率が小さくなり、放射光強度分布はp側にずれて、放射光強度分布の最大位置とMQW活性層116における最大利得位置とが一致する。なお、この場合、必ずしも厳密に一致する必要はない。

【0252】したがって、最大光学利得を発生させる位置に、放射光強度分布の最大位置が位置することになるので、光閉じ込め効率が高まり、しきい値電流密度J_{th}を低減することができる。

【0253】なお、上記の第3の実施の形態においては、n側光ガイド層としてアンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層115を用いているが、このような組成に限られるものではなく、適宜組成を変更しても良いものであり、その場合には、組成の変更に伴って最大光学利得を発生させる位置に放射光強度分布の最大位置が来るように、その層厚を適宜調整すれば良い。

【0254】次に、図7を参照して本発明の第4の実施の形態のMQW構造半導体レーザを説明するが、n型クラッド層及びn側光ガイド層の組成以外は、上述の第3の実施の形態と同様である。

図7参照

まず、上記の第3の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板111上に、厚さ50～300nm、例えば、100nmのAlGa_{0.15}Nバッファ層112、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmのGa_{0.15}N中間層113を成長させる。

【0255】引き続き、TMAIの流量比を第3の実施の形態より高めて、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Al_{0.2}Ga_{0.8}Nクラッド層122を成長させたのち、TMAI及びSiH₄の供給を停止して、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープGa_{0.15}N光ガイド層123を成長させる。

【0256】後は、上記の第3の実施の形態と同様に、

厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層と厚さ3~10nm、例えば、8nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を交互にアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が2~10層、例えば、5層になるように成長させ、MQW活性層116を形成する。

【0257】次いで、厚さ10~300nm、例えば、100nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型Ga N 光ガイド層117、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層118、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のp型Ga N コンタクト層119を成長させる。

【0258】次いで、n型SiC基板111の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極120を設けると共に、p型Ga N コンタクト層119上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが10 μm のNi電極121を設け、共振器長Lが700 μm となるように素子分割することによってMQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0259】この様に、本発明の第4の実施の形態においては、光ガイド層は対称構造であるが、n型クラッド層として、p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層118より禁制帯幅の大きなn型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ クラッド層122を用いているので、n側における屈折率が小さくなり、放射光強度分布はp側にずれて、放射光強度分布の最大位置とMQW活性層116における最大利得位置とが一致する。なお、この場合も、必ずしも厳密に一致する必要はない。

【0260】なお、上記の第4の実施の形態においては、n型クラッド層としてn型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ クラッド層122を用いているが、このような組成に限られるものではなく、適宜組成を変更しても良いものであり、その場合には、組成の変更に伴って最大光学利得を発生させる位置に放射光強度分布の最大位置が来るように、その層厚等を適宜調整すれば良い。

【0261】また、この場合の光ガイド層は必ずしも対称構造である必要はなく、上記第3の実施の形態のように、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくしても良く、n側光ガイド層とn型クラッド層の相乗効果により放射光強度分布の最大位置をp側に移動させても良いものである。

【0262】次に、図8を参照して本発明の第5の実施の形態のSQW構造半導体レーザを説明するが、n側光ガイド層の組成、活性層の構造、及び、オーバーフロー防止層以外は、上述の第3の実施の形態と同様である。

図8参照

まず、上記の第3の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板111上に、厚さ50~300nm、例えば、100nmのAlGa N バッファ層112、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm のGa N 中間層113、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層114を成長させる。

【0263】引き続き、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層124を成長させたのち、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3~10nm、例えば、8nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を成長させて、SQW活性層125を形成する。

【0264】次いで、厚さ5~50nm、例えば、20nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ オーバーフロー防止層126を成長させる。

【0265】後は、上記の第3の実施の形態と同様に、厚さ10~300nm、例えば、100nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型Ga N 光ガイド層117、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層118、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のp型Ga N コンタクト層119を成長させる。

【0266】次いで、n型SiC基板111の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極120を設けると共に、p型Ga N コンタクト層119上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが10 μm のNi電極121を設け、共振器長Lが700 μm となるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0267】このSQW半導体レーザにおいては、電子のオーバーフローを防止するために設けた広禁制帯幅のp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ オーバーフロー防止層126の存在により、放射光強度分布の最大位置がn側にずれることになるが、上記の様に、n側光ガイド層として、p型Ga N 光ガイド層117より禁制帯幅の大きなアンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層124を用いているので、p型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ オーバーフロー防止層126の影響を相殺し、放射光強度分布はp側にずれて、放射光強度分布の最大位置とSQW活性層125の中心

位置とが略一致することになる。なお、この場合も、必ずしも厳密に一致する必要はない。

【0268】なお、上記の第5の実施の形態においては、n側光ガイド層としてアンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層124を用いているが、この様な組成に限られるものでなく、オーバーフロー防止層の組成及び層厚に応じて、その組成及び層厚をSQW活性層125の中心位置に放射光強度分布の最大位置が来るように適宜調整すれば良い。

【0269】また、上記の第5の実施の形態においては、n側光ガイド層によってp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ オーバーフロー防止層126の影響を相殺しているが、n側クラッド層の禁制帯幅をp型クラッド層の禁制帯幅より大きくすることによって相殺しても良いものである。

【0270】また、この場合、光ガイド層は必ずしも対称構造である必要はなく、n側光ガイド層の禁制帯幅をp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくして、n側光ガイド層とn型クラッド層の相乗効果によりp型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ オーバーフロー防止層126の影響を相殺しても良いものである。

【0271】以上、本発明の第3乃至第5の実施の形態を説明してきたが、本発明は、実施の形態に記載された条件に限られるものではなく、例えば、上記の第3乃至第5の実施の形態の説明においては、活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ / $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるMQW構造或いはSQW構造を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0272】また、上記第3乃至第5の実施の形態における、p側光ガイド層とn側光ガイド層の層厚は同じであるが、p側光ガイド層の層厚をn側光ガイド層より厚くしても良く、例えば、n側ガイド層よりも10~100nm、例えば、50nm厚く形成して非対称光ガイド構造にしても良く、この場合には、p側光ガイド層の組成をn側光ガイド層の組成と同じようにしても良いものである。

【0273】また、上記の第3乃至第5の実施の形態においては光ガイド層は単層構造であるが、組成の異なった半導体層を用いて多層構造、或いは、グレーデッドバンド・ギャップ構造としても良く、例えば、第5の実施の形態の場合には、n側光ガイド層をn型クラッド層側から厚さ100nmのアンドープ GaN 光ガイド層及び厚さ20nmのアンドープ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 光ガイド層の2層構造にしても良い。

【0274】次に、図9乃至図14を参照して、p側光ガイド層におけるホール移動度を高めることにより或いはp側光ガイド層における再結合確率を低減することに

よってしきい値電流密度 J_{th} を低減させた本発明の第6乃至第11の実施の形態を説明する。まず、図9を参照して本発明の第6の実施の形態のSQW構造短波長半導体レーザを説明する。

図9参照

まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、TMGa、TMAI、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50~300nm、例えば、50nmの AlGaIn バッファ層212を成長させる。

【0275】引き続いて、TMGa、アンモニア、ドーパント源として SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型GaIn中間層213を成長させる。

【0276】引き続いて、TMAI、TMGa、アンモニア、ドーパントとして SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層214を成長させる。

【0277】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaIn光ガイド層215を成長させる。

【0278】引き続いて、TMGa、TMIIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3~30nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を成長させてSQW活性層216を形成する。

【0279】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、1130℃とし

た状態で、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンダーブGaN光ガイド層217を成長させる。

【0280】引き続いて、TMAI、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層218を成長させる。

【0281】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNコンタクト層219を成長させる。

【0282】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型GaNコンタクト層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極221を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0283】この本発明の第6の実施の形態においては、従来の常識に反してp側光ガイド層をアンダーブ層で構成しており、不純物に起因するキャリアの散乱がないのでホールの移動度が向上し、それによって、ホールの注入効率の向上が期待される。

【0284】また、p側光ガイド層をアンダーブ層にした場合には、不純物のドーピングに伴う結晶の劣化もなく、したがって、p側光ガイド層におけるレーザ発振に寄与しない再結合を大幅に低減することができる。

【0285】この結果、p側光ガイド層における無効電流が減少するので、低しきい値電流密度の短波長半導体レーザを作製することができ、また、無効電流に起因する熱の発生が抑制されるので、短波長半導体レーザの信頼性を向上することができる。

【0286】なお、この場合のアンダーブは、純粋なアンダーブである必要はなく、成長過程で多少の不純物が混入したものでも良いものであり、例えば、ホールの移動度としてレーザ発振に必要であると考えられる $2 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ 以上が得られれば良く、例えば、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下の不純物濃度であれば良い。

【0287】次に、図10を参照して、本発明の第7の実施の形態を説明する。なお、この第7の実施の形態においては、p側光ガイド層の層厚以外は上記の第6の実

施の形態と全く同様であるので、製造方法に関する説明は省略する。

図10参照

まず、上記の第6の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、厚さ50～300nm、例えば、50nmのAlGaNバッファ層212、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーピングのn型GaN中間層213、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーピングのn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層214を成長させる。

【0288】引き続いて、厚さt_nが10～300nm、例えば、100nmのアンダーブGaN光ガイド層215を成長させたのち、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンダーブIn_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3～30nm、例えば、5nmのアンダーブIn_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0289】次いで、厚さt_pが100nm以下、例えば、80nmのアンダーブGaN光ガイド層217、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーピングのp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層218、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーピングのp型GaNコンタクト層219を成長させる。

【0290】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型GaNコンタクト層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極221を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0291】この第7の実施の形態においては、p側光ガイド層の層厚t_pをn側光ガイド層の層厚t_nより薄く、即ち、t_p < t_nとしているので、p側光ガイド層における再結合電流が減少し、それによって、無効電流を減少することができるので、しきい値電流密度J_{th}を低減することが可能になる。

【0292】特に、p側光ガイド層の層厚t_pを100nm未満(0.1μm未満)に、より好適には0.08μm以下(80nm以下)にして薄くすることによって、p側光ガイド層における再結合電流が減少し、それによって、無効電流を減少することができるので、しきい値電流密度J_{th}を低減することが可能になる。なお、

p側光ガイド層の層厚 t_p が100nm未満の場合には、 $t_p = t_n$ としても良く、それによって、光ガイド構造の非対称性を補正することができる。

【0293】また、この場合のp側光ガイド層とn側光ガイド層の組成は必ずしも同じである必要はなく、p側光ガイド層の禁制帯幅がn側光ガイド層の禁制帯幅より大きくなるように組成を設定することによって、電子のオーバーフローを防止することができ、一方、n側光ガイド層の禁制帯幅がp側光ガイド層の禁制帯幅より大きくなるように組成を設定することによって、p側光ガイド層の薄層化に伴う光ガイド構造の非対称性を補正することができる。

【0294】また、この第7の実施の形態においては、p側光ガイド層をアンドープにしているのので、上述の第6の実施の形態と同様のホール移動度の向上の効果も得られるが、この場合には、p側光ガイド層をp型にドーピングしても良いものである。

【0295】次に、図11を参照して、本発明の第8の実施の形態を説明する。なお、図11(a)は、本発明の第8の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図であり、また、図14(b)は活性層近傍のバンド・ギャップ構造、即ち、伝導帯側のエネルギーレベルを示すものである。また、この第8の実施の形態においても、n側光ガイド層及びp側光ガイド層の構造以外は上記の第6の実施の形態とほぼ同様であるので、製造方法に関する説明は省略する。

図11(a)参照

まず、上記の第6の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGa_{0.15}Nバッファ層212、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型Ga_{0.85}N中間層213、及び、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層214を成長させる。

【0296】引き続き、厚さ10~100nm、例えば、50nmのアンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層222、及び、厚さ10~100nm、例えば、50nmのアンドープIn_{0.03}Ga_{0.97}N光ガイド層223を順次成長させたのち、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3~30nm、例えば、5nmのアンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0297】次いで、厚さ10~100nm、例えば、50nmのアンドープIn_{0.03}Ga_{0.97}N光ガイド層224、及び、厚さ10~100nm、例えば、50nm

で、不純物濃度が $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーパのp型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーパのp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層218、及び、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーパのp型Ga_{0.85}Nクラッド層219を成長させる。

【0298】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型Ga_{0.85}Nクラッド層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極221を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0299】図11(b)参照

この第8の実施の形態においては、n側光ガイド層及びp側光ガイド層が夫々禁制帯幅の異なる2層構造からなり、且つ、クラッド層に隣接する側の禁制帯幅を大きくしているのので、p側光ガイド層を構成するp型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225が電子に対するオーバーフロー防止層としても機能し、レーザ発振に必要な光閉じ込めを確保しつつ、p型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225或いはp型クラッド層への電子のリークを低減することができ、それによって、無効電流を減少することができるので、しきい値電流密度 J_{th} を低減することが可能になる。

【0300】なお、この第8の実施の形態においては、禁制帯幅のより大きなp側光ガイド層をp型層で構成しているが、上記の第6の実施の形態と同様にアンドープ層で構成しても良く、それによって、ホールの移動度を大きくすることができ、さらに、p側光ガイド層或いはn側光ガイド層を3層以上の多層構造で構成しても良く、この場合には、p側光ガイド層とn側光ガイド層の層数は同じでなくても良い。

【0301】次に、図12を参照して、本発明の第9の実施の形態を説明する。なお、図12(a)は、本発明の第9の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図であり、また、図12(b)は活性層近傍のバンド・ギャップ構造、即ち、伝導帯側のエネルギーレベルを示すものである。また、この第9の実施の形態は、n側光ガイド層の構造以外は上記の第3の実施の形態と同様であるので、製造方法に関する説明は省略する。

図12(a)参照

まず、上記の第1の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGa_{0.15}Nバッファ層212、

厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型Ga_{0.95}N中間層213、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層214を成長させる。

【0302】引き続いて、厚さ10~300nm、例えば、100nmのGa_{0.95}N光ガイド層226を成長させたのち、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンダーブレイク層In_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3~30nm、例えば、5nmのアンダーブレイク層In_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0303】次いで、厚さ10~100nm、例えば、50nmのアンダーブレイク層In_{0.03}Ga_{0.97}N光ガイド層224、及び、厚さ10~100nm、例えば、50nmで、不純物濃度が $1 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層218、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型Ga_{0.95}Nコンタクト層219を成長させる。

【0304】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型Ga_{0.95}Nコンタクト層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3 μm のNi電極221を設け、共振器長Lが700 μm となるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0305】図12(b)参照

この第9の実施の形態においては、n側光ガイド層を単一層で構成しているため成膜工程を短縮することができ、且つ、このn側光ガイド層の組成をp側光ガイド層の中間の禁制帯幅が得られる組成としているので、単一層を用いても光ガイド構造の非対称性を補正することができ、それによって、最大光学利得を発生させる位置に、放射光強度分布の最大位置が位置することになるので、しきい値電流密度 J_{th} を低減することができる。

【0306】この場合にも、p側光ガイド層を構成するp型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225が電子に対するオーバーフロー防止層としても機能するので、レーザ発振に必要な光閉じ込めを確保しつつ、p型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層225或いはp型クラッド層への電子のリークを低減することができ、それによって、無効電流を減少することができるので、しきい値電流密度 J_{th} を低減することが可能になる。

【0307】なお、この第9の実施の形態においても、禁制帯幅のより大きなp側光ガイド層をp型層で構成しているが、上記の第6の実施の形態と同様にアンダーブレイク層で構成しても良く、それによって、ホールの移動度を大きくすることができ、さらに、p側光ガイド層を3層以上の多層構造で構成しても良い。

【0308】次に、図13を参照して、本発明の第10の実施の形態を説明する。なお、図13(a)は、本発明の第10の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図であり、また、図13(b)は活性層近傍のバンド・ギャップ構造を示すものである。また、この第10の実施の形態は、n側光ガイド層及びp側光ガイド層の構造以外は上記の第6の実施の形態と同様であるので、製造方法に関する説明は殆ど省略する。

図13(a)参照

まず、上記の第6の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGa_{0.95}Nバッファ層212、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型Ga_{0.95}N中間層213、及び、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層214を成長させる。

【0309】引き続いて、TMGa、TMIn、TMAI、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、1130℃とした状態で、最初、TMInを供給しない状態で且つTMAIを次第に減少させる様に供給し、TMAIの供給を0とした時点で800℃まで降温してTMInの供給を開始し、次第にその供給量を増加させることによって、n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層214に接する部分の組成がAl_{0.05}Ga_{0.95}Nとなり、最終的な組成がIn_{0.03}Ga_{0.97}Nとなる、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンダーブレイク層In_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3~10nm、例えば、5nmのアンダーブレイク層In_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0310】引き続いて、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンダーブレイク層In_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3~10nm、例えば、5nmのアンダーブレイク層In_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0311】引き続いて、TMGa、TMIn、TMAI、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、800℃とした状態で、最初、TMAIを供給しない状態で且つ

TMInを次第に減少させる様に供給し、TMInの供給を0とした時点で1130℃に昇温してTMAIの供給を開始し、次第にその供給量を増加させることによって、SQW活性層216に接する部分の組成が $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ となり、最終的な組成が $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ となる、厚さ10～300nm、例えば、100nmのMgドープのp型グレーデッド光ガイド層228を成長させる。

【0312】引き続いて、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層218、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型GaNコンタクト層219を成長させる。

【0313】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型GaNコンタクト層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極221を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0314】図13(b)参照

この第10の実施の形態においては、p側光ガイド層は組成が連続的に変化しているグレーデッドバンド・ギャップ層で構成されており、p型クラッド層側の禁制帯幅の大きな領域が電子に対するオーバーフロー防止層として作用するとともに、活性層へのホールの注入効率が改善される。

【0315】また、この場合にも、p側光ガイド層を構成するp型グレーデッド光ガイド層228をp型層で構成しているが、上記の第6の実施の形態と同様にアンドープ層で構成しても良く、それによって、ホールの移動度を大きくすることができ、さらに、ビスシクロペンタジエニルマグネシウムの供給量を連続的に変化させることによって、活性層側をアンドープとしても良い。

【0316】なお、第10の実施の形態においては、アンドープグレーデッド光ガイド層227及びp型グレーデッド光ガイド層228のクラッド層に接する部分のAl比は0.05の $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ となっているが、クラッド層のAl比と同じ0.15の $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 或いはその近傍の混晶比のAlGaIn層としても良いものであり、この様に、クラッド層に接する部分のAl比を高めることによりホールの注入効率をより改善することが可能になる。

【0317】次に、図14を参照して、本発明の第11の実施の形態を説明する。なお、図14(a)は、本発明の第11の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図であり、また、図14(b)は活性層近傍のバンド・ギ

ャップ構造、即ち、伝導帯側のエネルギーレベルを示すものである。また、この第11の実施の形態は、p側光ガイド層の構造以外は上記の第9の実施の形態とほぼ同様であるので、製造方法に関する説明はほぼ省略する。

図14(a)参照

まず、上記の第6の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板211上に、厚さ50～300nm、例えば、50nmのAlGaInバッファ層212、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型GaIn中間層213、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層214を成長させる。

【0318】引き続いて、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層229を成長させたのち、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3～30nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を成長させて、SQW活性層216を形成する。

【0319】引き続いて、TMGa、TMIn、TMAI、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、1130℃とした状態で、TMAIを次第に減少させる様に供給し、SQW活性層216に接する部分の組成が $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{N}$ となり、最終的な組成がGaInとなる、厚さ10～300nm、例えば、100nmのMgドープのp型逆グレーデッド光ガイド層230を成長させる。なお、p型クラッド層に接する側の組成はInGaInとしても良い。

【0320】次いで、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層218、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のMgドープのp型GaInコンタクト層219を成長させる。

【0321】次いで、n型SiC基板211の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極220を設けると共に、p型GaInコンタクト層219上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極221を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0322】図14(b)参照

この第11の実施の形態においては、p側光ガイド層を活性層側の禁制帯幅が大きな逆グレーデッド層で構成しているため、このp側光ガイド層を構成する禁制帯幅の大きな領域が電子に対するオーバーフロー防止層として機能するので、p側光ガイド層への電子のリークを低減することができ、それによって、p側光ガイド層における再結合を低減することができる。

【0323】また、このp側光ガイド層は、逆グレーデッドバンド・ギャップ構造であるため、ホールに対するエネルギースパイクが形成されないため、従来のオーバーフロー防止層と比較してホールに対するバリアになりにくく、ホールの注入効率を低減させることがない。

【0324】また、この場合も、n側光ガイド層は単一層で構成しているため、光ガイド構造の非対称性を補正するために、このn側光ガイド層の組成をp側光ガイド層の中間の禁制帯幅が得られる組成とすることが望ましい。

【0325】また、この場合も、p側光ガイド層をp型層で構成しているが、上記の第6の実施の形態と同様にアンドープ層で構成しても良く、それによって、ホールの移動度を大きくすることができる。

【0326】以上、本発明の第6乃至第11の実施の形態を説明してきたが、本発明は実施の形態の構成に限られるものでなく、例えば、第6乃至第11の実施の形態においては、活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるSQW構造を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0327】また、上記の第6乃至第11の実施の形態においては、活性層をSQW構造で構成しているものの、MQW構造にしても良いものであり、この場合には、例えば、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層と厚さ3~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を交互にアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が2~10層、例えば、5層になるように成長させることによって、MQW活性層を形成すれば良い。

【0328】次に、図15及び図16を参照して、成長速度を制御することにより転位密度及びPL波長分布を低減し、それによって、しきい値電流密度 J_{th} を低減する本発明の第12の実施の形態の短波長半導体レーザの製造方法を説明する。

図15参照

まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板311の表面を CF_4 を用いたドライ・エッチングによって0.1~2

μm 、例えば、0.2 μm 除去して、表面欠陥密度を低減させたのち、TMGa、TMAI、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGaInバッファ層312を成長させる。

【0329】引き続き、TMGa、アンモニア、ドーパントとして、 SiH_4 、及び、キャリアガスを用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のSiドープのn型GaIn中間層313を成長させる。

【0330】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、ドーパントとして、 SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、0.5 μm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層314を成長させる。

【0331】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaIn光ガイド層315を成長させる。

【0332】引き続き、TEGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、成長速度 r_g を0.1 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上、例えば、0.3 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上の条件で、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層と厚さ3~10nm、例えば、8nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を交互にアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が2又は3層、例えば、2層になるように成長させ、MQW活性層316を形成する。

【0333】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaIn光ガイド層317を成長させる。

【0334】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、

キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層318を成長させる。

【0335】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての窒素を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.15}Nコンタクト層319を成長させる。

【0336】次いで、n型SiC基板311の裏面にはn側電極として厚さ100 nmのNi電極320を設けると共に、p型Ga_{0.15}Nコンタクト層319上にはp側電極として厚さ100 nm、幅Wが3 μmのNi電極321を設け、共振器長Lが700 μmとなるように素子分割することによってMQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0337】上記の第12の実施の形態においては、活性層の成長速度として、0.1 μm/h以上、特に、0.3 μm/hを採用しているが、ここで図16を参照して活性層の結晶性と成長速度の因果関係を説明する。
図16(a)参照

図16(a)は、InGa_{0.15}N活性層のPL波長の標準偏差の成長速度依存性を示す図であり、図から明らかなように、成長速度 r_g が0.1 μm/h以下の0.075 μm/hの場合に、TMI(トリメチルインジウム)の流量の増加と共に、PL波長の標準偏差が増大してInGa_{0.15}Nの組成不均一が増加するばかりであり、400 nm以上の平均PL波長組成において、高品質のInGa_{0.15}N混晶が得られないことが明らかである。

【0338】一方、成長速度 r_g が0.1 μm/h以上の0.3 μm/hの場合には、TMIの流量が増加してもPL波長の標準偏差が小さなままで平均PL波長が増加し、即ち、In組成比が増加し、420 nm付近ではPL波長の標準偏差が低減している。

【0339】このことから、成長速度を大きくすることによって組成不均一を抑制できることが分かり、少なくとも、0.3 μm/h近傍の成長速度の場合には、青色半導体レーザとして好適な波長範囲の組成を有するInGa_{0.15}N活性層を結晶性良く成長させることが可能であることが分かる。

【0340】図16(b)参照

図16(b)は、PL光強度の成長速度依存性を示す図であり、図から明らかなように、成長速度が大きい方が

PL光強度が高くなっており、特に、青色半導体レーザとして好適な長波長側において相対的に大きなPL光強度が得られており、この事実からも成長速度が大きい方が組成のより均一な結晶が得られることが分かる。

【0341】そして、本発明の第12の実施の形態によれば、品質の良好なSiC基板を用い、且つ、その表面をドライ・エッチングにより除去して表面欠陥密度を低減することにより、転位密度が 10^9 cm^{-2} 以下で、且つ、PLピーク波長が90 meV以下のInGa_{0.15}N活性層が得られ、それによって、キンクのないI-L特性が得られることになる。

【0342】そして、今までの経験を踏まえて、成長速度 r_g が0.075 μm/hの場合の結果と対比すると、0.3 μm/h以上の場合に非常に良好な活性層が得られるものと推定され、また、少なくとも、0.2 μm/hまでは良好な活性層が得られ、さらに、0.1 μm/hの場合にも実用に耐え得る程度の活性層が得られるものと考えられる。

【0343】このことは、成長速度が遅いほど均質な結晶が得られると考えられていた従来常識と反するものであり、この点からもInを構成要素として含むナイトライド系化合物半導体の特殊性は明らかである。

【0344】以上、本発明の第12の実施の形態を説明してきたが、第12の実施の形態の条件に限られるものではなく、その技術思想の範囲において各種の変更が可能であり、例えば、上記の第12の実施の形態においては、井戸層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$)の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$)の範囲内で変えても良い。

【0345】また、上記の第12の実施の形態の説明においては、活性層をMQW活性層16で構成しているが、SQW活性層を用いて良いものであり、この場合にも成長速度を0.1 μm/h以上、例えば、0.3 μm/hとした成長条件において、厚さ1～10 nm、例えば、5 nmのアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層で挟持された、厚さ3～30 nm、例えば、8 nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層からなるSQW活性層を成長させれば良い。

【0346】また、上記の第12の実施の形態においては、活性層として正孔の移動度を高めるためにアンドープ層を用いているが、アンドープ層の場合、不可避免的に不純物がオートドープされることがあるので、結果的な不純物濃度としては、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であれば良い。

【0347】次に、図17及び図18を参照して、p型クラッド層に狭禁制帯幅領域を設け、この狭禁制帯幅領域において発光性再結合を行わせてオーバーフロー電流

による発熱を防止することによってしきい値電流密度 J_{th} を低減させる、本発明の第13乃至第15の実施の形態を説明する。まず、図17を参照して本発明の第13の実施の形態を説明する。なお、図17(a)は、本発明の第13の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図であり、また、図17(b)は活性層近傍の伝導帯側のエネルギーレベルを示す図である。

図17(a)参照

まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板411上に、TMGa、TMA1、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50~300 nm、例えば、50 nmのAlGa_{0.15}Nバッファ層412を成長させる。

【0348】引き続き、TMGa、アンモニア、ドーパント源としてSiH₄、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Ga_{0.95}N中間層413を成長させる。

【0349】引き続き、TMA1、TMGa、アンモニア、ドーパントとしてSiH₄、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層414を成長させる。

【0350】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10~300 nm、例えば、100 nmのアンダーブGaN光ガイド層415を成長させる。

【0351】引き続き、TMGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1~10 nm、例えば、5 nmのアンダーブIn_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層で挟持された厚さ3~30 nm、例えば、5 nmのアンダーブIn_{0.15}Ga_{0.85}N井戸層を成長させてSQW活性層416を形成する。

【0352】引き続き、TMGa、アンモニア、及

び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、1130℃とした状態で、厚さ10~300 nm、例えば、100 nmのアンダーブGaN光ガイド層417を成長させる。

【0353】引き続き、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.05~0.50 μm、例えば、0.2 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層418を成長させる。

【0354】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さTが1~500 nm、例えば、100 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.95}N中間層419を成長させる。

【0355】引き続き、再び、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.05~0.50 μm、例えば、0.2 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層420を成長させる。

【0356】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.95}Nコンタクト層421を成長させる。

【0357】次いで、n型SiC基板411の裏面にはn側電極として厚さ100 nmのNi電極422を設けると共に、p型Ga_{0.95}Nコンタクト層421上にはp側電極として厚さ100 nm、幅Wが3 μmのNi電極423を設け、共振器長Lが700 μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0358】この本発明の第13の実施の形態においては、p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層418、420

の間に、 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 層より結晶性の良好で狭禁制帯幅のp型Ga_{0.85}N中間層419を挟み込んでいるので、オーバーフローしてきた電子は、このp型Ga_{0.85}N中間層419に効果的に滞留し、発光性再結合することになるので、電子がp側電極まで達して発熱の原因となることがない。

【0359】したがって、素子温度が上昇しないので、オーバーフロー電流はほぼ一定のままであり、発熱によるオーバーフロー電流の増加という悪循環を断ち切ることができ、この結果、低しきい値電流密度の短波長半導体レーザを作製することができ、p側電極の劣化による素子劣化も抑制されるので信頼性を向上することができる。

【0360】また、この場合、p型Ga_{0.85}N中間層を $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度にドーピングしているので、同じ厚さのp型クラッド層を $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ で構成した場合に比べて、p型クラッド層の抵抗をより小さくすることができる。

【0361】次に、伝導帯側のエネルギーレベルを示す図18(a)を参照して、本発明の第14の実施の形態を説明する。なお、この第14の実施の形態においては、中間層の構成以外は上記の第13の実施の形態と全く同様であるので、製造方法に関する説明は省略する。図18(a)参照

まず、上記の第13の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板の上に、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGa_{0.85}Nバッファ層、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型Ga_{0.85}N中間層、及び、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層414を成長させる。

【0362】引き続いて、厚さが10~300nm、例えば、100nmのアンドープGa_{0.85}N光ガイド層415を成長させたのち、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3~30nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を成長させて、SQW活性層416を形成する。

【0363】次いで、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGa_{0.85}N光ガイド層417、厚さ0.05~0.50μm、例えば、0.2μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーパのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層418を成長させる。

【0364】次いで、TMA1、TMGaの流量比を連続的に変えることによって、Al組成比が中間部におい

て最低のGa_{0.85}Nになるように連続的に変化した厚さTが1~500nm、例えば、100nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のグレーデッド中間層324を成長させる。

【0365】次いで、厚さ0.05~0.50μm、例えば、0.2μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドーパのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層420、及び、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.85}Nコンタクト層を成長させる。

【0366】次いで、n型SiC基板の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極を設けると共に、p型Ga_{0.85}Nコンタクト層上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0367】この第14の実施の形態においては、中間層をU字状の禁制帯幅分布を有するグレーデッド中間層424で構成しているため、ホールのp側光ガイド層への注入をスムーズに行うことができる。

【0368】なお、この場合、グレーデッド中間層424の中央部の狭禁制帯幅部分をノン・ドーピングにしても良く、この部分の結晶性を改善することによって、発光性再結合の確率を高めることができる。

【0369】次に、伝導帯側のエネルギーレベルを示す図18(b)を参照して、本発明の第15の実施の形態を説明する。なお、この第15の実施の形態においても、中間層の構成以外は上記の第13の実施の形態と全く同様であるので、製造方法に関する説明は省略する。図18(b)参照

まず、上記の第13の実施の形態と同様に、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板の上に、厚さ50~300nm、例えば、50nmのAlGa_{0.85}Nバッファ層、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型Ga_{0.85}N中間層、及び、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のSiドーパのn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層414を成長させる。

【0370】引き続いて、厚さが10~300nm、例えば、100nmのアンドープGa_{0.85}N光ガイド層415を成長させたのち、厚さ1~10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で挟持された厚さ3~30nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を成長させて、SQW活性層41

6を形成する。

【0371】次いで、厚さ10～300nm、例えば、100nmのアンドープGaN光ガイド層417、厚さ0.05～0.50μm、例えば、0.2μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドープのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層418を成長させる。

【0372】次いで、TMAI、TMGaの流量比を交互に連続的に増減させることによって、Al組成比が $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ からGaNへ連続的に変化する多層構造からなる厚さ1～500nm、より好適には、10～500nm、例えば、100nmの多層構造中間層425を形成する。なお、この場合の1周期の厚さは、0.3～50nm、より好適には、1～50nm、例えば20nmとし、組成がGaNに近い幅3nm(=30Å)程度の狭禁制帯幅の部分をアンドープとする。

【0373】次いで、厚さ0.05～0.50μm、例えば、0.2μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のMgドープのp型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層420、及び、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNコンタクト層を成長させる。

【0374】次いで、n型SiC基板の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極を設けると共に、p型GaNコンタクト層上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってSQW構造短波長半導体レーザが完成する。

【0375】この第15の実施の形態においては、中間層を多層構造中間層425で構成しているので、狭禁制帯幅の部分をアンドープにしてもp型クラッド層全体の抵抗をそれ程増加させることはなく、アンドープにすることによって結晶性を高めて発光性再結合の確率を高めることができ、発熱をより効果的に抑制することができる。

【0376】なお、上記の第15の実施の形態においては、多層構造中間層425を禁制帯幅が連続的に変化するよう構成することによってホールの注入をスムーズに行うようにしているが、ステップ・ファンクション的に変化する多層構造で構成しても良いものである。

【0377】以上、本発明の第13乃至第15の実施の形態を説明してきたが、本発明は実施の形態の構成に限られるものではなく、例えば、第13乃至第15の実施の形態においては、中間層をGaN或いは、最低の禁制帯幅の部分がGaNになる様に構成しているが、AlGaN或いはInGaNにしても良いものである。

【0378】また、上記の第13乃至第15の実施の形態においては、活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}$

$0.05\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなるSQW構造を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0379】また、上記の第13乃至第15の実施の形態においては、活性層をSQW構造で構成しているものの、MQW構造にしても良いものであり、この場合には、例えば、厚さ1～10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層と厚さ3～10nm、例えば、5nmのアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層を交互にアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 井戸層が2～10層、例えば、5層になるように成長させることによって、MQW活性層を形成すれば良い。

【0380】さらに、上記の実施の形態においては、p側光ガイド層をアンドープ層で構成しているが、p型にドープしても良いものである。

【0381】次に、図19及び図20を参照して、MQW活性層を構成するバリア層の厚さを制御することによりキャリアの不均一注入を改善し、それによって、しきい値電流密度 J_{th} を低減させる、本発明の第16及び第17の実施の形態を説明する。まず、図19を参照して本発明の第16の実施の形態の短波長半導体レーザを説明する。なお、図19(a)は、本発明の第16の実施の形態のMQW半導体レーザの斜視図であり、また、図19(b)は図19(a)において破線の手で示すMQW活性層近傍の層構造を示す拡大図である。

図19(a)及び(b)参照

まず、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の6H-SiCからなるn型SiC基板511上に、TMGa、TMAI、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ50～300nm、例えば、50nmのAlGaNバッファ層512を成長させる。

【0382】引き続いて、TMGa、アンモニア、ドーパント源として SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1～2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型GaN中間層513を成長させる。

【0383】引き続いて、TMAI、TMGa、アンモニア、ドーパントとして SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70～760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800～

1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層514を成長させる。

【0384】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaN光ガイド層515を成長させる。

【0385】引き続いて、TMGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を550~900℃、例えば、700℃とした状態で、厚さ1nm~5nm未満、例えば、3nmのアンドープIn_{0.05}Ga_{0.95}Nバリア層518で分離された厚さ3~10nm、例えば、4nmのアンドープIn_{0.15}Ga_{0.85}Nウエル層517を2~10層、例えば、3層成長させてMQW活性層516を形成する。

【0386】引き続いて、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、1130℃とした状態で、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaN光ガイド層519を成長させる。

【0387】引き続いて、TMAI、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層520を成長させる。

【0388】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型GaNコンタクト層521を成長させる。

【0389】次いで、n型SiC基板511の裏面にはn側電極として厚さ100nmのNi電極522を設けると共に、p型GaNコンタクト層521上にはp側電極として厚さ100nm、幅Wが3μmのNi電極523を設け、共振器長Lが700μmとなるように素子分割することによってMQW半導体レーザが完成する。

【0390】この本発明の第16の実施の形態においては、MQW活性層516を構成するバリア層の厚さを5nm未満にしているため、キャリアの注入効率が改善され、キャリアの不均一注入をなくすることができる。

【0391】また、従来の閃亜鉛鉱型結晶構造の半導体の場合には、バリア層を薄くした場合には、波動関数のしみ出しの問題が生ずるが、本発明のようなナイトライド系化合物半導体の場合には、キャリアの有効質量が大きいため波動関数のしみ出しが少なく、バリア層の厚さを5nm未満にしても光学利得の発生の低下は問題にならない。

【0392】なお、バリア層の厚さは5nm未満であれば十分であり、また、バリア層のIn組成比は0.04未満でも良いが、バリア層の膜厚の低下による歪低減効果を有効に利用するためには、バリア層の厚さを3nm以下とし、且つ、InGaNからなるバリア層のIn組成比を0.04以上にすることによって、結晶性の劣化を来すことなくバリア層の禁制帯幅を小さくし、障壁の高さを低くすることによってキャリアの注入効率をより改善することができる。

【0393】次に、図20を参照して、基板としてサファイア基板を用いた本発明の第17の実施の形態のMQW半導体レーザを説明する。

図20参照

図20は、本発明の第17の実施の形態のMQW半導体レーザの斜視図であり、まず、(0001)面を主面とするサファイア基板531上に、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとして水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、500℃の成長温度において、厚さ0.03μmのGaN低温バッファ層532を成長させる。

【0394】引き続いて、TMGa、アンモニア、ドーパント源としてSiH₄、及び、キャリアガスとして水素を用いて、成長圧力を70~760Torr、例えば、100Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、920℃とした状態で、厚さ0.1~2.0μm、例えば、1.0μmで、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型GaN中間層533を成長させる。

【0395】以下は、上記の第16の実施の形態の同様に、厚さ0.1~2.0μm、例えば、1.0μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のn型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層534、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaN光ガイド層535、MQW活性層536、厚さ10~300nm、例えば、100nmのアンドープGaN光ガイド層537、厚さ0.1~2.0μm、例えば、0.5μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、2.

$0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の p 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層 538、及び、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.5 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の p 型 GaN コンタクト層 539 を順次エピタキシャル成長させる。

【0396】なお、この場合の MQW 活性層 536 も、厚さ $1 \text{ nm} \sim 5 \text{ nm}$ 未満、例えば、 3 nm のアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層で分離された厚さ $3 \sim 10 \text{ nm}$ 、例えば、 4 nm のアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ ウエル層を $2 \sim 10$ 層、例えば、3 層成長させて形成する。

【0397】次いで、ドライエッチングにより n 型 GaN 中間層 533 の一部を露出させて、n 側電極として Ti 電極 540 を設けると共に、p 型 GaN コンタクト層 539 上には p 側電極として幅 W が $3 \mu\text{m}$ の Ni 電極 541 を設けたのち、ドライ・エッチングを施して共振器面となる間隔 L が $700 \mu\text{m}$ となる一対の平行な端面を形成することによって MQW 半導体レーザが完成する。

【0398】この本発明の第 17 の実施の形態においても、MQW 活性層 516 を構成するバリア層の厚さを 5 nm 未満にしているので、キャリアの注入効率が改善され、それによってキャリアの不均一注入をなくすることができる。

【0399】また、この場合も、バリア層の膜厚の薄層化による歪低減効果を有効に利用するためには、バリア層の厚さを 3 nm 以下とし、且つ、 InGaN からなるバリア層の In 組成比を 0.04 以上にすることによって、結晶性の劣化を来すことなくバリア層の障壁の高さを低くすることができ、それによってキャリアの注入効率をより改善することができる。

【0400】以上、本発明の第 16 及び第 17 の実施の形態を説明してきたが、本発明は上記の第 16 及び第 17 の実施の形態の構成に限られるものではなく、例えば、第 16 及び第 17 の実施の形態においては、多重量子井戸活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N} / \text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ からなる MQW 構造を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガイド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0401】次に、図 21 乃至図 23 を参照して、オーバーフロー防止層、即ち、エレクトロンブロック層をアンドープ層或いはグレーデッド層にすることによりホール注入効率を改善し、それによって、しきい値電流密度 J_{th} を低減させる、本発明の第 18 及び第 19 の実施の形態を説明する。まず、図 21 を参照して本発明の第 18 の実施の形態の MQW 半導体レーザを説明する。

図 21 参照

まず、 (0001) 面、即ち、c 面を主面とする六方晶

の 6H-SiC からなる n 型 SiC 基板 611 上に、TMGa、TMAI、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いた MOVPE 法によって、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 950°C とした状態で、厚さ $50 \sim 300 \text{ nm}$ 、例えば、 50 nm の AlGaIn バッファ層 612 を成長させる。

【0402】引き続き、TMGa、アンモニア、ドーバント源として SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 920°C とした状態で、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.5 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の n 型 GaIn 中間層 613 を成長させる。

【0403】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、ドーバントとして SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 950°C とした状態で、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.5 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の n 型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層 614 を成長させる。

【0404】引き続き、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 930°C とした状態で、厚さ $10 \sim 300 \text{ nm}$ 、例えば、 100 nm のアンドープ GaIn 光ガイド層 615 を成長させる。

【0405】引き続き、TMGa、TMIn、アンモニア、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $550 \sim 900^\circ\text{C}$ 、例えば、 700°C とした状態で、厚さ $1 \text{ nm} \sim 10 \text{ nm}$ 、例えば、 5 nm のアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層で分離された厚さ $3 \sim 10 \text{ nm}$ 、例えば、 4 nm のアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ ウエル層を $2 \sim 10$ 層、例えば、3 層成長させて MQW 活性層 616 を形成する。

【0406】引き続き、TMAI、TMGa、アンモニア、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ Torr}$ 、例えば、 100 Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 950°C とした状態で、厚さ $5 \sim 30 \text{ nm}$ 、例えば、 20 nm のアンドープ $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブロック層 617 を成長させる。

【0407】引き続き、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{ To}$

rr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、1130℃とした状態で、厚さ10～300 nm、例えば、100 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.99}N光ガイド層618を成長させる。

【0408】引き続いて、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層619を成長させる。

【0409】引き続いて、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、930℃とした状態で、厚さ0.1～2.0 μm、例えば、0.5 μmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のp型Ga_{0.99}Nコンタクト層620を成長させる。

【0410】次いで、n型SiC基板611の裏面にはn側電極として厚さ100 nmのNi電極621を設けると共に、p型Ga_{0.99}Nコンタクト層620上にはp側電極として厚さ100 nm、幅Wが3 μmのNi電極622を設け、共振器長Lが700 μmとなるように素子分割することによってMQW半導体レーザが完成する。

【0411】この第18の実施の形態においては、Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層がアンドープ層であるので、ホール濃度が低下し、且つ、高い印加電圧Vを必要とするが、不純物による散乱がなくなるので実効移動度が大きくなり、したがって、従来のようにエレクトロンブロック層を $5.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 5.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度の不純物濃度のp型層で形成した場合に対するホール濃度の低下分を補うことになり、総合的にはホールの注入効率の改善効果が期待されるものである。なお、Ga_{0.99}N系半導体におけるアンドープ層の不純物濃度は、一般的には $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であるので、意図的ドーパした場合には、 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であれば、アンドープ層と同様の効果が得られる。

【0412】また、上記の第18の実施の形態におけるp側光ガイド層は、説明を簡単にするためにp型層で構成しているが、アンドープ層で構成しても良いものであり、また、n側光ガイド層はアンドープ層で構成しているが、n型層で構成しても良いものである。

【0413】次に、図22及び図23を参照して、本発

明の第19の実施の形態のMQW半導体レーザを説明する。なお、図22(a)は、本発明の第19の実施の形態のMQW半導体レーザの光軸に垂直な断面図であり、また、図22(b)は、MQW活性層近傍のバンドダイヤグラムであり、さらに、図23は効果の説明図である。

図22(a)参照

まず、上記の第18実施の形態と全く同様に、n型SiC基板611上に、AlGa_{0.99}Nバッファ層612、n型Ga_{0.99}N中間層613、n型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層614、アンドープGa_{0.99}N光ガイド層615、及び、MQW活性層616を形成する。

【0414】引き続いて、TMA1、TMGa、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしてのN₂を用いて、成長圧力を70～760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800～1200℃、例えば、950℃とした状態で、TMA1を0から徐々に連続的に増加させて厚さ1～20 nm、例えば、10 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{15} \sim 3.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のp型グレーデッドAlGa_{0.99}N層623を成長させ、次いで、TMA1/TMGa比率を一定にして厚さ1～20 nm、例えば、10 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{15} \sim 3.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のp型Al_{0.18}Ga_{0.82}N層624を成長させ、次いで、TMA1/TMGa比率を0まで連続的に減少させて厚さ1～20 nm、例えば、10 nmで、不純物濃度が $1.0 \times 10^{15} \sim 3.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のp型グレーデッドAlGa_{0.99}N層625を成長させ、これらのp型グレーデッドAlGa_{0.99}N層623、p型Al_{0.18}Ga_{0.82}N層624、及び、p型グレーデッドAlGa_{0.99}N層625によって禁制帯幅がスムーズに連続的に変化するp型エレクトロンブロック層626を形成する。

【0415】以降は、再び、第18の実施の形態と全く同様に、p型Ga_{0.99}N光ガイド層618、p型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層619、及び、p型Ga_{0.99}Nコンタクト層620を順次成長させる。

【0416】次いで、ドライ・エッチングによりp型Ga_{0.99}Nコンタクト層620及びp型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層619をメサエッチングし、n型SiC基板611の裏面にはn側電極として厚さ100 nmのNi電極621を設けると共に、p型Ga_{0.99}Nコンタクト層620上にはストライプ状開口を有するSiO₂膜627を介してp側電極として厚さ100 nmのNi電極622を設け、共振器長Lが700 μmとなるように素子分割することによってMQW半導体レーザが完成する。

【0417】図22(b)参照

この本発明の第19の実施の形態においては、p型エレクトロンブロック層626を、p型グレーデッドAlG

aN層623、p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 層624、及び、p型グレーデッド AlGaIn 層625によって構成しているので、禁制帯幅をスムーズに連続的に変化させることができると共に、電子親和力も連続的に変化させることができ、それによって、n側においてはMQW活性層616を構成する $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層とp型グレーデッド AlGaIn 層623との間の電子親和力の差を殆どなくすることができ、それによって $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層とp型グレーデッド AlGaIn 層623との界面にホールに対する電位障壁となるノッチが形成されることがない。

【0418】また、p側においてはp型 GaIn 光ガイド層618とp型グレーデッド AlGaIn 層625との間の電子親和力の差をなくすることができ、それによってp型 GaIn 光ガイド層618とp型グレーデッド AlGaIn 層625との界面においてもホールに対する電位障壁となるノッチが形成されることがない。

【0419】したがって、p型エレクトロンブロック層626の両側において、ホールに対する電位障壁となるノッチが形成されないので、ホールの注入効率が改善され、それによって駆動電圧を低下することができる。

【0420】図23参照

図23は、p型グレーデッド AlGaIn 層623及びp型グレーデッド AlGaIn 層625を設けた場合の効果を説明するためのシミュレーションによる電圧-電流特性を示す図である。図から明らかなように、p型グレーデッド AlGaIn 層623及びp型グレーデッド AlGaIn 層625を設けることにより、従来の様に、オーバーフロー防止層、即ち、エレクトロンブロック層にグレーデッド層を設けない場合に比べて、駆動電圧を低くすることが理解され、これは上述の様にノッチの形成を抑制したことに起因するものである。

【0421】なお、この第19の実施の形態の説明においては、グレーデッド層を組成が一定のp型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 層624の両側に設けているが、何方か一方のみに設けても良いものであり、両方設ける場合に比べてホールの注入効率の改善の程度は低いものの、グレーデッド層を設けない場合に比べてホールの注入効率が改善される。

【0422】また、上記の第19の実施の形態においては、p型エレクトロンブロック層226の不純物濃度として、従来と同様に価電子帯側に不純物伝導による寄与が顕著にならない程度の不純物濃度を採用しているが、 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上、より好適には、 $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高濃度にドーピングしても良いものであり、この場合には、不純物伝導によるホールの注入効率の改善と、ノッチの消滅によるホールの注入効率の改善との両方の寄与が期待される。

【0423】さらに、上記の第19の実施の形態におけるp型エレクトロンブロック層626を、上記の第18

の実施の形態と同様に、アンドープ層としても良く、この場合には、アンドープ化に伴うホールの実効移動度の向上によるホールの注入効率の改善と、ノッチの消滅によるホールの注入効率の改善との両方の寄与が期待される。

【0424】なお、上記の第19の実施の形態及びその変形例においても、p側光ガイド層をp型 GaIn 光ガイド層618の代わりにアンドープ GaIn 光ガイド層を用いて構成しても良く、また、n側光ガイド層をアンドープ GaIn 光ガイド層615の代わりにn型 GaIn 光ガイド層を用いて構成しても良い。

【0425】以上、本発明の第18及び第19の実施の形態を説明してきたが、本発明は上記の第18及び第19の実施の形態の構成に限られるものではなく、例えば、 SiC 基板ではなく従来と同様にサファイア基板を用いても良いものであり、その場合には、まず、従来と同様に、(0001)面を主面とするサファイア基板上に、 TMGa 、アンモニア、及び、キャリアガスとして水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、500℃の成長温度において、厚さ0.03 μm の GaIn 低温バッファ層を成長させ、次いで、 TMGa 、アンモニア、及び、キャリアガスとして水素を用いて、成長圧力を70~760 Torr、例えば、100 Torrとし、成長温度を800~1200℃、例えば、950℃とした状態で、厚さ0.1~2.0 μm 、例えば、1.0 μm のn型 GaIn 中間層を成長させる。

【0426】以降は、上記の第18及び第19の実施の形態の全く同様に、n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層、n側 GaIn 光ガイド層、MQW活性層、エレクトロンブロック層、p側 GaIn 光ガイド層、p型 GaIn 光ガイド層、p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層、及び、p型 GaIn コンタクト層を順次エピタキシャル成長させる。なお、この場合のエレクトロンブロック層は、対応する実施の形態に応じた構成とする。

【0427】次いで、それ以降は、従来例と同様に、ドライ・エッチングによりp型 GaIn 層及びp型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層をメサエッチングすると共に、n型 GaIn 中間層の一部を露出させて、n型 GaIn 中間層の露出部に Ti/Au からなるn側電極を設けると共に、p型 GaIn コンタクト層上にはストライプ状開口を有する SiO_2 膜を介して Ni/Au からなるp側電極を設け、次いでドライ・エッチングを施して共振器面となる一対の平行な端面を形成すれば良い。

【0428】また、上記の第18及び第19の実施の形態においては、多重量子井戸活性層として $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ からなるMQW構造を採用しているが、必要とする波長に応じて混晶比を $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_y\text{N}$ ($0 \leq x < 1$, $0 < y \leq 1$) の範囲内で変えても良いものであり、且つ、それに伴って、光ガ

イド層及びクラッド層の混晶比を $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_{1-a-b}\text{N}$ ($0 \leq a \leq 1$, $0 \leq b \leq 1$) の範囲内で変えても良い。

【0429】例えば、上記の第18及び第19の実施の形態においては、バリア層としては InGaIn ウエル層に対して InGaIn を用いているが、 InGaIn の代わりに AlGaIn 或いは GaIn を用いても良いものであり、特に、 AlGaIn 或いは GaIn を用いた場合には、バリア層とグレーデッド層を用いたエレクトロンブロック層との界面におけるノッチを完全に消滅することができる。

【0430】次に、図24乃至図30を参照して、エレクトロンブロック層の不純物濃度を $7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以上とすると共に、エレクトロンブロック層の成長温度を $600^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ とすることによって、電子のオーバーフローを防止し、それによって、しきい値電流密度を低減させる、本発明の第20の実施の形態を説明する。まず、図24を参照して、本発明の第20の実施の形態の短波長半導体レーザの製造工程を説明する。

図24参照

まず、改良レイリー法によりバルク成長させた、(0001)面、即ち、c面を主面とする六方晶の 6H-SiC からなるキャリア濃度が $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 SiC 基板711上に、 TMGa 、 TMAI 、アンモニア、ドーパント源として SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を成長ガスとして用いたMOVPE法によって、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $50 \text{nm} \sim 5 \mu\text{m}$ 、例えば、 350nm で、不純物濃度が不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ バッファ層712を成長させる。

【0431】引き続き、 TMAI 、 TMGa 、アンモニア、ドーパントとして SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.55 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層713を成長させる。

【0432】引き続き、 TMGa 、アンモニア、ドーパントとして SiH_4 、及び、キャリアガスとしての水素を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $10 \sim 300 \text{nm}$ 、例えば、 100nm で、不純物濃度が $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のn型 GaIn 光ガイド層714を成長させる。

【0433】引き続き、 TMGa 、 TMIIn 、アンモニア、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $600 \sim 900^\circ\text{C}$ 、例えば、 780°C とした状態で、厚さ $1 \text{nm} \sim 10 \text{nm}$ 、例えば、 5nm のアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層で分離された厚さ $3 \sim 10 \text{nm}$ 、例えば、 4nm のアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ ウエル層を $2 \sim 10$ 層、例えば、3層成長させてMQW活性層715を形成する。

【0434】引き続き、 TMAI 、 TMGa 、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $600 \sim 900^\circ\text{C}$ 、例えば、 780°C とした状態で、厚さ $5 \sim 30 \text{nm}$ 、例えば、 20nm で、不純物濃度が $7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以上、例えば、 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ の p^+ 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブロック層716を成長させる。

【0435】引き続き、 TMGa 、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $10 \sim 300 \text{nm}$ 、例えば、 100nm で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のp型 GaIn 光ガイド層717を成長させる。

【0436】引き続き、 TMAI 、 TMGa 、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.55 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のp型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層718を成長させる。

【0437】引き続き、 TMGa 、アンモニア、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム、及び、キャリアガスとしての N_2 を用いて、成長圧力を $70 \sim 760 \text{Torr}$ 、例えば、 100Torr とし、成長温度を $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、例えば、 1100°C とした状態で、厚さ $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 、例えば、 $0.1 \mu\text{m}$ で、不純物濃度が $1.0 \times 10^{17} \sim 1.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のp型 GaIn 第1コンタクト層719を成長させ、引き続き、p型 GaIn 第1コンタクト層719と同じ条件で、不純物濃度が $5.0 \times 10^{19} \sim 5.0 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、例えば、 $1.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ で、厚さが $5 \sim 50 \text{nm}$ 、例えば、 20nm の p^+ 型 GaIn 第2コンタクト層720を成長させる。なお、この場合の成長速度は、n型層712～714について

は、 $2\mu\text{m/hr}$ とし、MQW活性層715については、 $0.3\mu\text{m/hr}$ とし、 p^+ 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブロック層716については、 $0.9\mu\text{m/hr}$ とし、また、 p 型層717~720については、 $2.6\mu\text{m/hr}$ とする。

【0438】次いで、 n 型 SiC 基板711の裏面を研磨して、全体の厚さが $100\mu\text{m}$ 程度まで薄くしたのち、ドライ・エッチングにより p^+ 型 GaN 第2コンタクト層720乃至 p 型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層718をメサエッチングして、例えば、幅が $4\mu\text{m}$ で高さが $0.5\mu\text{m}$ のストライプ状メサを形成する。

【0439】次いで、 n 型 SiC 基板711の裏面には Ni/Ti/Au からなる n 側電極722を設けると共に、 p^+ 型 GaN 第2コンタクト層720上には、例えば、幅が $2\mu\text{m}$ のストライプ状開口を有する SiO_2 膜721を介して Ni/Ti/Au からなる p 側電極723を設け、共振器長 L が $700\mu\text{m}$ となるように素子分割することによってMQW半導体レーザが完成する。なお、ストライプの方向は $\langle 1-100 \rangle$ 方向とし、劈開面は $\langle 1-100 \rangle$ 面とする。

【0440】図25参照

図25は上記の第20の実施の形態のMQW半導体レーザの電流-光出力特性を測定した結果の内、最もしきい値電流の小さかった素子の電流-光出力特性を示すものであり、図から明らかなように、しきい値電流の最小値は 380mA であった。また、図示しないものの、今回測定した内での最大値は 600mA で、平均は 500mA であり、それ以前のしきい値電流である $650\sim 1600\text{mA}$ 、平均値 900mA に比較して大幅にしきい値電流が低減している。

【0441】この様な、 p^+ 型エレクトロンブロック層を用いた効果を確認するために、上記の半導体レーザと同様の結晶成長工程で表面発光型LEDを作製して発光スペクトルを測定したので、その結果を図26及び図28を参照して説明する。

図26(a)及び(b)参照

図26(b)は、測定のために作製した表面発光型LEDの概略的断面図であり、また、図26(a)は上面図であり、 (0001) 面、即ち、 c 面を主面とする六方晶の 6H-SiC からなるキャリア濃度が $4\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ の n 型 SiC 基板731上に、厚さが $0.35\mu\text{m}$ で、不純物濃度が不純物濃度が $8\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ の n 型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ バッファ層732、厚さが $0.55\mu\text{m}$ で、不純物濃度が $2.0\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ の n 型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層733、厚さ 100nm で、不純物濃度が $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ の n 型 GaN 光ガイド層734、厚さが 5nm のアンドープ $\text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$ バリア層で分離された厚さ 4nm のアンドープ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ ウエル層を3層成長させたMQW活性層735、厚さが 20nm の p 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクト

ロンブロック層736、厚さが 100nm で、不純物濃度が $5.0\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の p 型 GaN 光ガイド層737、厚さが $0.2\mu\text{m}$ で、不純物濃度が $5.0\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の p 型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層738、厚さが $0.1\mu\text{m}$ で、不純物濃度が $5.0\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ の p 型 GaN 第1コンタクト層739、厚さが 20nm で、不純物濃度が $1.5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ の p^+ 型 GaN 第2コンタクト層740を順次堆積させる。

【0442】次いで、 n 型 SiC 基板731の裏面には Ni/Ti/Au からなる n 側電極741を設けるとともに、 p^+ 型 GaN 第2コンタクト層740の表面には略正方形の開口部を有する SiO_2 膜742を介して Ni/Au からなる半透明電極743を設け、その周囲に Ni/Au からなるボンディングパッド744を設けることによって p 側電極を形成する。なお、半透明電極743を介して見えている p^+ 型 GaN 第2コンタクト層740の寸法は $37\mu\text{m}$ 角であり、また、素子寸法は $300\mu\text{m}$ 角である。

【0443】この様な、表面発光型LEDを、 p 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブロック層736の Mg 濃度を $0\sim 2\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ の範囲で変化させるとともに、 p 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブロック層736の成長温度を 780°C 及び 1100°C の2つの温度にして結晶成長を行った。

【0444】ついで、この表面発光型LEDに、室温において、幅 $100\mu\text{s}$ で、周波数が 1kHz のパルス電流を順方向に 100mA 通電し、半透明電極743から放射される光をレンズで集光したのち、グレーティングを通して分光し、光電子増倍管により検出することによって測定を行った。

【0445】図27参照

図27は、表面発光型LEDとして、従来の条件であるエレクトロンブロック層の Mg 濃度が $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ で、成長温度が 1100°C の試料と、新条件であるエレクトロンブロック層の Mg 濃度が $1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ で、成長温度が 780°C の試料との測定結果を比較したものである。図から明らかなように、新条件において、 InGaN からなるMQW活性層735の発光中心波長である 400nm 近傍の発光強度が格段に強くなっており、強度比にして約10倍になっている。

【0446】また、従来条件のLEDにおいては、波長 363nm をピークにした p 型 GaN 光ガイド層737の発光が存在するが、新条件のLEDにおいては、この波長帯の発光がほとんど見られず、このことから、 p 型 GaN 光ガイド層737へオーバーフローする電子が無くなったものと考えられる。

【0447】図28(a)参照

図28(a)は、 InGaN からなるMQW活性層735における発光強度の Mg 濃度依存性を表す図であり、図から明らかなように、 $7\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 近傍を境にし

て発光強度が急激に増加し、従来条件の場合と比較すると3桁程度増加する。また、同じMg濃度の場合には、成長温度を780℃とした新条件の場合に、2桁程度以上の発光強度の増加が見られる。

【0448】図28(b)参照

図28(b)は、p型Ga_{0.18}N光ガイド層737における発光強度のMg濃度依存性を表す図であり、図から明らかなように、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 近傍を境にして発光強度が減少するが、成長温度を780℃とした新条件の場合には、Mg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とした場合に、発光がほとんど観測されなかった。

【0449】以上の図27及び図28の測定結果から、上記の第20の実施の形態の様に、p⁺型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層716のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上、より好適には、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上にすることによって電子のオーバーフローを防止することができ、MQW活性層715において効率良く再結合が行われるので、しきい値電流密度 J_{th} の低減が可能になる。

【0450】特に、p⁺型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層716の結晶成長温度をMQW活性層715と同じ範囲の600℃～900℃、例えば、780℃とした場合に、効果が顕著になる。なお、下限の600℃はInGa_{0.18}Nの単結晶成長が可能な温度の下限であり、また、上限の900℃はInGa_{0.18}Nの成長温度の実質的な上限である。

【0451】この様に、p⁺型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層716のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上にすることにより、電子のオーバーフローがほぼ完全に抑制される理由は不明であるが、 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ はMgが活性化する濃度限界以上の高不純物濃度であるので、p⁺型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層716の価電子帯側の禁制帯に高密度の不純物準位が形成され、この不純物準位がホールの注入効率の改善に役立ち、その結果、電子のオーバーフローが抑制されるとも考えられるので、この事情を図29を参照して説明する。

【0452】図29参照

図29はMQW活性層715近傍のバンドダイヤグラムであり、p型Ga_{0.18}N光ガイド層717におけるホールは、不純物準位724によるトンネル伝導或いは不純物準位724を介した不純物伝導によってMQW活性層715に注入されるので、ホールの注入効率が改善され、その結果、従来においてはp型Ga_{0.18}N光ガイド層717に滞留したホールの電界により引き寄せられていた電子が引き寄せられなくなるので、電子のオーバーフローが抑制されるのではないかと考えられ、それによって、しきい値電流密度 J_{th} 低くすることが可能になる。

【0453】図29及び図42(a)参照

また、このMQW半導体レーザを駆動する場合、p型G

a_{0.18}N光ガイド層717の価電子帯のバンド端が不純物準位724に達する程度に印加電圧Vをすれば良く、図29と図42(a)との対比から明らかなように、従来のMQW半導体レーザに比べて駆動電圧を低くすることが可能になる。

【0454】次に、図30を参照して、従来の短波長半導体レーザのp型エレクトロンブロック層、即ち、p型オーバーフロー防止層におけるMg濃度が $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であった理由について検討する。

図30(a)参照

図30(a)は、p型Ga_{0.18}N層におけるp型キャリア濃度、即ち、ホール濃度のMg濃度依存性を調べた図であり、Mg濃度が低い場合、p型キャリア濃度はMg濃度と共に増加するが、Mg濃度が約 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の時に最大になり、それ以上のMg濃度では逆に低下する。

【0455】この様なp型Ga_{0.18}N層におけるp型キャリア濃度のMg濃度依存性は、p型Al_{0.18}Ga_{0.82}N層についても成立するものであり、したがって、p⁺型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層716においても、 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ を境としてp型キャリア濃度が低下すると考えられる。

【0456】この様に、あるドーパント濃度を境として、それ以上のドーパント濃度でキャリア濃度が飽和或いは低下する現象は、他の化合物半導体においても一般的に見られる現象であり、従来の短波長半導体レーザにおいて、p型エレクトロンブロック層のMg濃度として $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ という値が用いられているのは、上述の事情によるものと推測される。

【0457】したがって、本発明の第20の実施の形態の様に、p型エレクトロンブロック層のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とすることは、p型キャリア濃度を増加させる手段としては全く有効ではなく、かえって不利であるので、Mgの濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上とすることによって電子のオーバーフローが抑制されるという本発明者による新たな知見なしには採用し得ない構成である。

【0458】また、キャリア濃度が飽和するような高ドーピング濃度領域においては、過剰ドーピングによる結晶性の低下という現象が見られることが一般的であり、結晶性の低下に伴ってキャリアの移動度も低下するので、他に特段の事情がない限り過剰ドーピングは採用されない手法であり、この点からも、p型エレクトロンブロック層のMg濃度を $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上にすることは予測し得ないものである。

【0459】図30(b)参照

図30(b)は、MOVPE法で成長させたp型Ga_{0.18}N層におけるp型キャリア濃度の成長温度依存性を調べた図であり、成長温度の上昇と共にp型キャリア濃度が増加する。即ち、成長温度を低くするとp型キャリア濃度は増加せず、逆に低下することが分かる。

【0460】この様なp型Ga_{0.95}N層におけるp型キャリア濃度の成長温度依存性は、p型AlGa_{0.15}N層についても成立するものであり、したがって、p型エレクトロンブロック層の成長温度を、本発明のように600℃～900℃とするのは、600℃～900℃、より好適には730℃～830℃、例えば、780℃とすることによって電子のオーバーフローが抑制されるという本発明者による新たな知見なしには採用し得ない構成である。

【0461】また、Ga_{0.95}N層或いはAlGa_{0.15}N層の成長温度を900℃以下と低くすると、表面モロロジーが著しく悪化するため、通常は、p型Ga_{0.95}N層或いはp型AlGa_{0.15}N層の結晶成長温度として900℃～1200℃の範囲、例えば、1100℃の高い温度を採用しており、この点からも、p型エレクトロンブロック層の結晶成長温度を600℃～900℃にすることは予測し得ないものである。

【0462】以上、本発明の第20の実施の形態を説明してきたが、本発明は実施の形態に記載した構成に限られるものではなく、各種の変更が可能であり、例えば、p型エレクトロンブロック層をAl_{0.18}Ga_{0.82}Nで構成しているが、この様な組成比に限られるものでなく、他の組成比のAlGa_{0.15}Nでも良く、さらには、活性層及びp型クラッド層の組成に応じてAl_xGa_yIn_{1-x-y}N (0<x<1、0<y<1) の範囲内で変えても良いものである。

【0463】また、上記の本発明の第20の実施の形態の説明においては、活性層としてウエル層が3層のMQW活性層を用いているが、他の構成のMQW活性層、例えば、厚さ5nmの6層のIn_{0.03}Ga_{0.97}Nバリア層によって、厚さ2.5nmの5層のIn_{0.15}Ga_{0.85}Nウエル層を交互に挟んだMQW活性層等を用いても良く、さらには、SQW活性層を用いても良いものである。

【0464】また、上記の本発明の第20の実施の形態の説明においては、p側光ガイド層をp型層で、また、n側光ガイド層をn型層で構成しているが、少なくとも一方をアンドープ層で構成しても良いものである。

【0465】

【発明の効果】本発明の第1及び第2の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる短波長半導体レーザの活性層を厚さ3nm以上の単一の利得層で構成すると共に、光ガイド層を設ける或いは利得層をアンドープ層にすることによってしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、また、キャビティロスが大きい場合には、井戸層が厚さ6nm以上の3層以下の多重量子構造とすることによってもしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、それによって低消費電力化が可能になり、熱の発生を最小限に抑制することができるので信頼性を向上することができ、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが

大きい。

【0466】また、本発明の第3乃至第5の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる短波長半導体レーザにおける最大光学利得位置と放射光強度分布の最大位置とが一致するように、光ガイド層及び／又はクラッド層の禁制帯幅及び厚さを選択しているで、光閉じ込め効果を高めてしきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、それによって、低消費電力化が可能になり、熱の発生を最小限に抑制することができるので信頼性が向上し、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが大きい。

【0467】また、本発明の第6乃至第11の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる短波長半導体レーザのp側光ガイド層におけるホール移動度を高め、或いは、p側光ガイド層における再結合確率を低減しているで、しきい値電流密度 J_{th} を低減することができ、それによって、低消費電力化が可能になり、熱の発生を最小限に抑制することができるので信頼性が向上し、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが大きい。

【0468】また、本発明の第12の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる半導体発光素子の活性層を成長させる場合に、その成長速度を0.1μm/h以上、より好適には、0.3μm/h以上とすることによって、転位密度が 10^9 cm^{-2} 以下で、PL波長の標準偏差の少なく、PLピーク波長分布が90meV以下、より好適には、50meV以下のInGa_{0.15}N活性層を再現性良く製造することができるので、青色半導体レーザの低しきい値電流密度化が可能になり、それによって、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが大きい。

【0469】また、本発明の第13乃至第15の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる短波長半導体レーザのp型クラッド層に狭禁制帯幅の部分設け、この狭禁制帯幅の部分でオーバーフローしてきた電子を発光性再結合させているので、オーバーフロー電流による発熱を大幅に低減することができ、それによって、発熱によるオーバーフロー電流の増加という悪循環を断ち切ることができるので、低しきい値電流密度化が可能になり、また、電極劣化による素子劣化が抑制されるので信頼性が向上し、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが大きい。

【0470】また、本発明の第16及び第17の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる多重量子井戸構造半導体レーザの多重量子井戸活性層を構成するバリア層の膜厚を5nm未満にしているで、キャリアの不均一注入を改善し、光学利得の不均一な発生を改善することができるので、それによってしきい値電流密度 J_{th} が低減され、低消費電

力化が可能になり、また、信頼性が向上するので、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが多い。

【0471】また、本発明の第18及び第19の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる半導体レーザに挿入するエレクトロンブロック層を、アンドープ層、或いは、グレーデッド層を備えた層によって構成しているのでホールの注入効率を改善することができ、それによってしきい値電流密度 J_{th} が低減されて低消費電力化が可能になり、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが多い。

【0472】さらに、本発明の第20の実施の形態を基本構成とする発明によれば、ナイトライド系化合物半導体からなる半導体レーザに挿入するp型エレクトロンブロック層を、Mg濃度が $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高濃度層によって構成しているので、電子をオーバーフローを殆ど完全に抑制することができ、それによってしきい値電流密度 J_{th} が低減されて低消費電力化が可能になり、光情報記録装置等の光源としてその高密度化に寄与するところが多い。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理的構成の説明図である。

【図2】モード利得と電流密度の相関の井戸層の層数依存性の説明図である。

【図3】本発明の第1の実施の形態における J_{th} の活性層の層厚依存性の説明図である。

【図4】本発明の第1の実施の形態の半導体レーザの斜視図である。

【図5】本発明の第2の実施の形態の半導体レーザの斜視図である。

【図6】本発明の第3の実施の形態のMQW構造半導体レーザの斜視図である。

【図7】本発明の第4の実施の形態のMQW構造半導体レーザの斜視図である。

【図8】本発明の第5の実施の形態のSQW構造半導体レーザの斜視図である。

【図9】本発明の第6の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図である。

【図10】本発明の第7の実施の形態のSQW半導体レーザの斜視図である。

【図11】本発明の第8の実施の形態のSQW半導体レーザの説明図である。

【図12】本発明の第9の実施の形態のSQW半導体レーザの説明図である。

【図13】本発明の第10の実施の形態のSQW半導体レーザの説明図である。

【図14】本発明の第11の実施の形態のSQW半導体レーザの説明図である。

【図15】本発明の第12の実施の形態の短波長半導体

レーザの斜視図である。

【図16】本発明の第12の実施の形態におけるPL波長の標準偏差及びPL光強度の成長速度依存性の説明図である。

【図17】本発明の第13の実施の形態の説明図である。

【図18】本発明の第14及び第15の実施の形態の説明図である。

【図19】本発明の第16の実施の形態のMQW半導体レーザの説明図である。

【図20】本発明の第17の実施の形態のMQW半導体レーザの斜視図である。

【図21】本発明の第18の実施の形態のMQW半導体レーザの説明図である。

【図22】本発明の第19の実施の形態のMQW半導体レーザの説明図である。

【図23】本発明の第19の実施の形態における効果の説明図である。

【図24】本発明の第20の実施の形態のMQW半導体レーザの説明図である。

【図25】本発明の第20の実施の形態のMQW半導体レーザの電流-光出力特性の説明図である。

【図26】本発明の第20の実施の形態における効果を確認するために作製した表面発光型LEDの説明図である。

【図27】表面発光型LEDの発光スペクトル強度の構成条件依存性の説明図である。

【図28】表面発光型LEDにおける発光強度のMg濃度依存性の説明図である。

【図29】本発明の第20の実施の形態のMQW半導体レーザのMQW活性層近傍のバンドダイヤグラムである。

【図30】p型GaN層におけるp型キャリア濃度の構成条件依存性の説明図である。

【図31】従来の短波長半導体発光素子の説明図である。

【図32】従来の短波長半導体レーザの説明図である。

【図33】従来のMQW半導体レーザの発振時のバンドダイヤグラムである。

【図34】従来のMQW構造短波長半導体レーザにおけるホール電流の層位置依存性の説明図である。

【図35】従来のMQW半導体レーザの発振時のホール密度分布の説明図である。

【図36】従来のMQW半導体レーザの発振時の電子密度分布の説明図である。

【図37】従来のMQW短波長半導体レーザにおける光学利得と放射光強度分布の説明図である。

【図38】従来のMQW半導体レーザの光出力-電流特性の説明図である。

【図39】量子井戸構造活性層の発光効率の In_xGa

1-x Nバリア層のIn組成比x依存性の説明図である。

【図40】オーバーフロー電流のクラッド層組成依存性の説明図である。

【図41】オーバーフロー電流の素子温度依存性の説明図である。

【図42】従来の短波長半導体レーザのバンドダイヤグラムの説明図である。

【図43】従来の短波長半導体レーザのPLピーク波長分布の説明図である。

【図44】従来の短波長半導体レーザにおける光出力特性の説明図である。

【図45】従来の短波長半導体レーザにおけるPLピーク波長のヒストグラムと光強度の相関の説明図である。

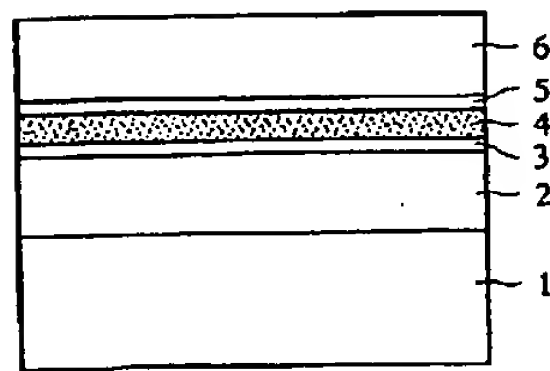
【符号の説明】

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| 1 | 基板 | 213 | n型Ga _{0.15} N中間層 |
| 2 | クラッド層 | 214 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 3 | 光ガイド層 | 215 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 4 | 活性層 | 216 | SQW活性層 |
| 5 | 光ガイド層 | 217 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 6 | クラッド層 | 218 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 11 | n型SiC基板 | 219 | p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 |
| 12 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 | 220 | Ni電極 |
| 13 | n型Ga _{0.15} N中間層 | 221 | Ni電極 |
| 14 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 222 | アンドープAl _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 |
| 15 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 | 223 | アンドープIn _{0.03} Ga _{0.97} N光ガイド層 |
| 16 | SQW活性層 | 224 | アンドープIn _{0.03} Ga _{0.97} N光ガイド層 |
| 17 | p型Ga _{0.15} N光ガイド層 | 225 | p型Al _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 |
| 18 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 226 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 19 | p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 | 227 | アンドープグレーデッド光ガイド層 |
| 20 | Ni電極 | 228 | p型グレーデッド光ガイド層 |
| 21 | Ni電極 | 229 | アンドープAl _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 |
| 22 | MQW活性層 | 230 | p型逆グレーデッド光ガイド層 |
| 111 | n型SiC基板 | 311 | n型SiC基板 |
| 112 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 | 312 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 |
| 113 | n型Ga _{0.15} N中間層 | 313 | n型Ga _{0.15} N中間層 |
| 114 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 314 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 115 | アンドープAl _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 | 315 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 116 | MQW活性層 | 316 | MQW活性層 |
| 117 | p型Ga _{0.15} N光ガイド層 | 317 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 118 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 318 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 119 | p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 | 319 | p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 |
| 120 | Ni電極 | 320 | Ni電極 |
| 121 | Ni電極 | 321 | Ni電極 |
| 122 | n型Al _{0.2} Ga _{0.8} Nクラッド層 | 411 | n型SiC基板 |
| 123 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 | 412 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 |
| 124 | アンドープAl _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 | 413 | n型Ga _{0.15} N中間層 |
| 125 | SQW活性層 | 414 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 126 | p型Al _{0.2} Ga _{0.8} Nオーバーフロー防止層 | 415 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| 211 | n型SiC基板 | 416 | SQW活性層 |
| 212 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 | 417 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| | | 418 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| | | 419 | p型Ga _{0.15} N中間層 |
| | | 420 | p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| | | 421 | p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 |
| | | 422 | Ni電極 |
| | | 423 | Ni電極 |
| | | 424 | グレーデッド中間層 |
| | | 425 | 多層構造中間層 |
| | | 511 | n型SiC基板 |
| | | 512 | AlGa _{0.15} Nバッファ層 |
| | | 513 | n型Ga _{0.15} N中間層 |
| | | 514 | n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| | | 515 | アンドープGa _{0.15} N光ガイド層 |
| | | 516 | MQW活性層 |

- 517 アンダーブ $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ ウエル層
- 518 アンダーブ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層
- 519 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 520 p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
- 521 p型 GaN コンタクト層
- 522 Ni 電極
- 523 Ni 電極
- 531 サファイア基板
- 532 GaN 低温バッファ層
- 533 n型 GaN 中間層
- 534 n型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
- 535 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 536 MQW 活性層
- 537 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 538 p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
- 539 p型 GaN コンタクト層
- 540 Ti 電極
- 541 Ni 電極
- 611 n型 SiC 基板
- 612 AlGaIn バッファ層
- 613 n型 GaN 中間層
- 614 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 615 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 616 MQW 活性層
- 617 アンダーブ $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブ
ロック層
- 618 p型 GaN 光ガイド層
- 619 p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 620 p型 GaN コンタクト層
- 621 Ni 電極
- 622 Ni 電極
- 623 p型 グレーデッド AlGaIn 層
- 624 p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 層
- 625 p型 グレーデッド AlGaIn 層
- 626 p型 エレクトロンブロック層
- 627 SiO_2 膜
- 711 n型 SiC 基板
- 712 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ バッファ層
- 713 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 714 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 715 MQW 活性層
- 716 p⁺ 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブ
ロック層
- 717 p型 GaN 光ガイド層
- 718 p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 719 p型 GaN 第1コンタクト層
- 720 p⁺ 型 GaN 第2コンタクト層
- 721 SiO_2 膜
- 722 n側電極
- 723 p側電極
- 724 不純物準位
- 731 n型 SiC 基板
- 732 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ バッファ層
- 733 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 734 アンダーブ GaN 光ガイド層
- 735 MQW 活性層
- 736 p⁺ 型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ エレクトロンブ
ロック層
- 737 p型 GaN 光ガイド層
- 738 p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 739 p型 GaN 第1コンタクト層
- 740 p⁺ 型 GaN 第2コンタクト層
- 741 n側電極
- 742 SiO_2 膜
- 743 半透明電極
- 744 ボンディングパッド
- 811 サファイア基板
- 812 GaIn バッファ層
- 813 n型 GaN バッファ層
- 814 n型 $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層
- 815 n型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
- 816 n型 GaN 光ガイド層
- 817 InGaInMQW 活性層
- 818 p型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 層
- 819 p型 GaN 光ガイド層
- 820 p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラッド層
- 821 p型 GaN コンタクト層
- 822 n側電極
- 823 p側電極
- 824 n型 GaN 層
- 825 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 活性層
- 826 p型 GaN 層
- 831 サファイア基板
- 832 GaIn バッファ層
- 833 n型 GaN 中間層
- 834 n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 835 n型 GaN 光ガイド層
- 836 MQW 活性層
- 837 p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ オーバーフロー防止層
- 838 p型 GaN 光ガイド層
- 839 p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 840 p型 GaN コンタクト層
- 841 n側電極
- 842 SiO_2 膜
- 843 p側電極
- 844 電圧印加時の価電子帯のバンド端
- 845 ノッチ
- 846 ノッチ

【図1】

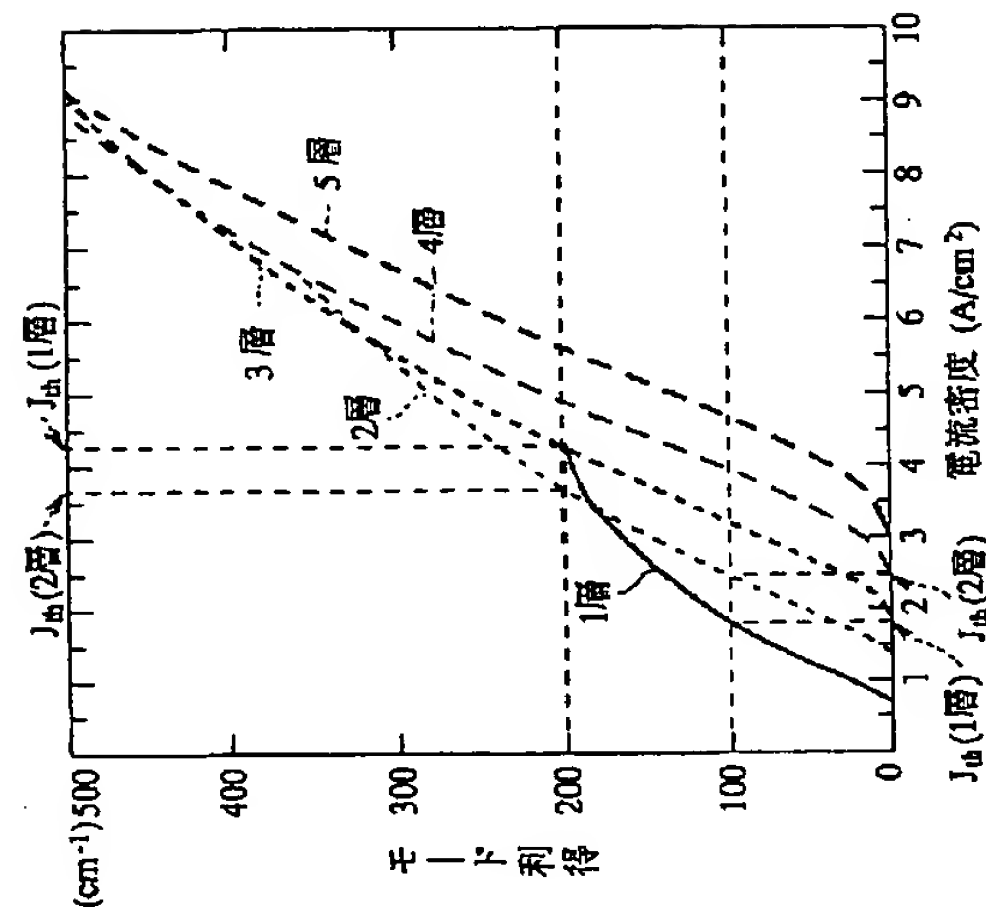
本発明の原理的構成の説明図



- 1:基板
2:クラッド層
3:光ガイド層
4:活性層
5:光ガイド層
6:クラッド層

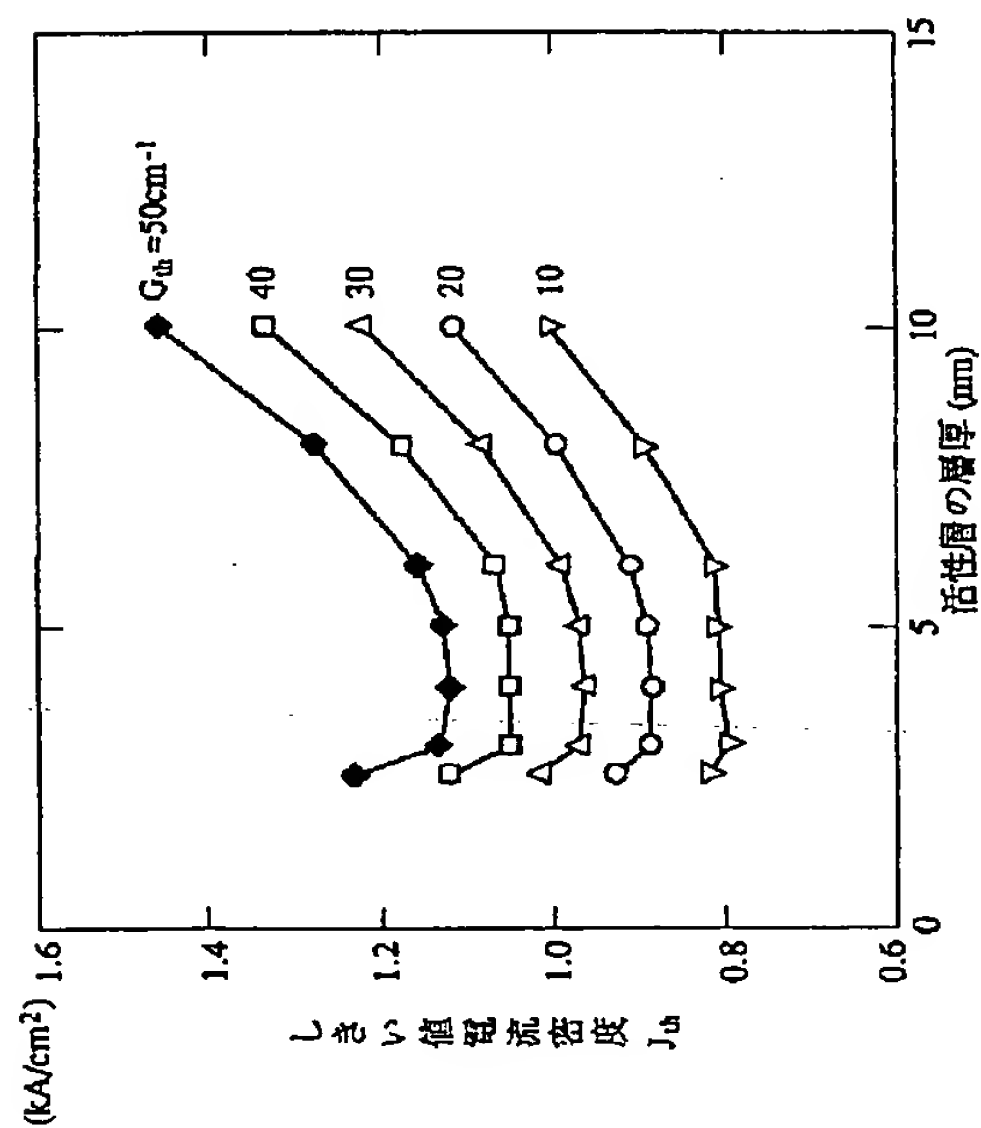
【図2】

モード利得と電流密度の相関の井戸層の層数依存性の説明図

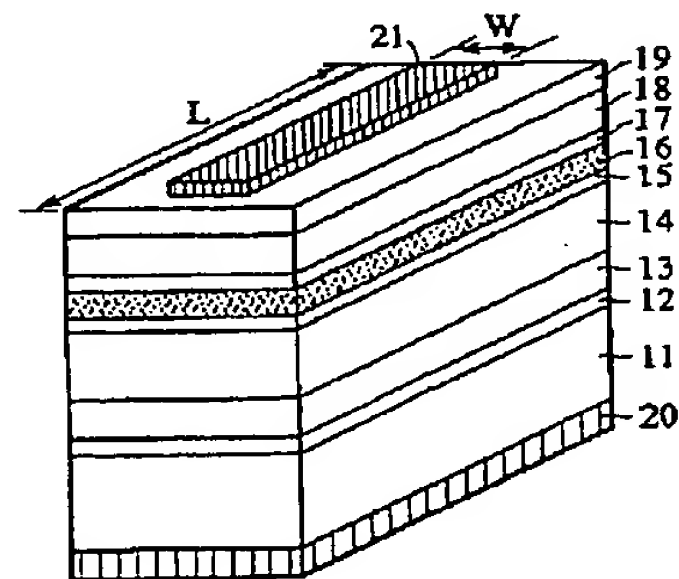


【図4】

【図3】

本発明の第1の実施の形態における J_{th} の活性層の層厚依存性の説明図

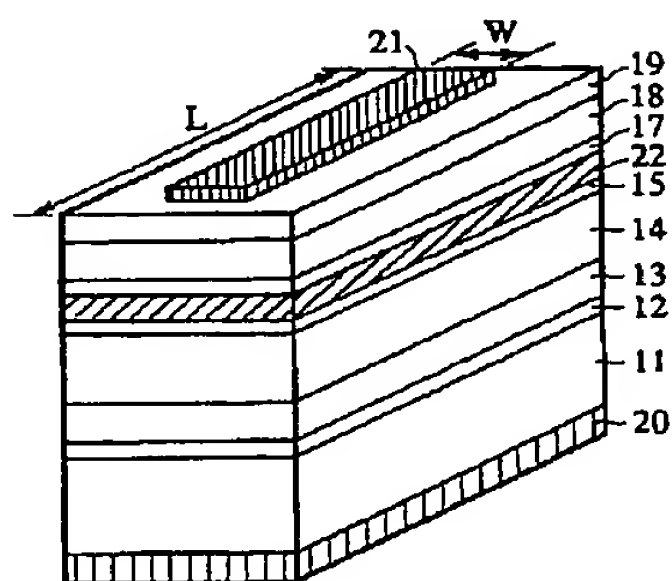
本発明の第1の実施の形態の半導体レーザの斜視図



- | | |
|---|---|
| 11:n型SiC基板 | 17:p型GaN光ガイド層 |
| 12:AlGaInバッファ層 | 18:p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 13:n型GaIn中間層 | 19:p型GaInコンタクト層 |
| 14:n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 20:Ni電極 |
| 15:70nm-70nm GaN光ガイド層 | 21:Ni電極 |
| 16:SQW活性層 | |

【図5】

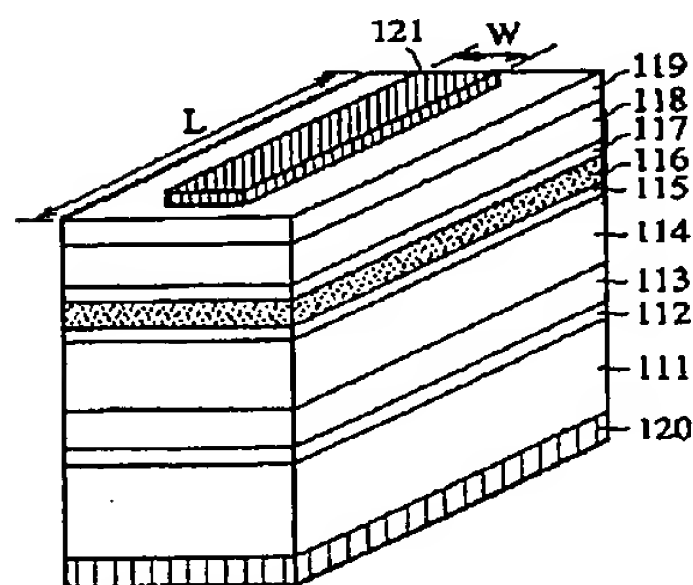
本発明の第2の実施の形態の半導体レーザの斜視図



- | | |
|---|---|
| 11:n型SiC基板 | 17:p型Ga _{0.15} N光ガイド層 |
| 12:AlGa _{0.15} Nバッファ層 | 18:p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラフト層 |
| 13:n型Ga _{0.15} N中間層 | 19:p型Ga _{0.15} Nコンタクト層 |
| 14:n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラフト層 | 20:Ni電極 |
| 15:アンダー・ブ・Ga _{0.15} N光ガイド層 | 21:Ni電極 |
| | 22:MQW活性層 |

【図6】

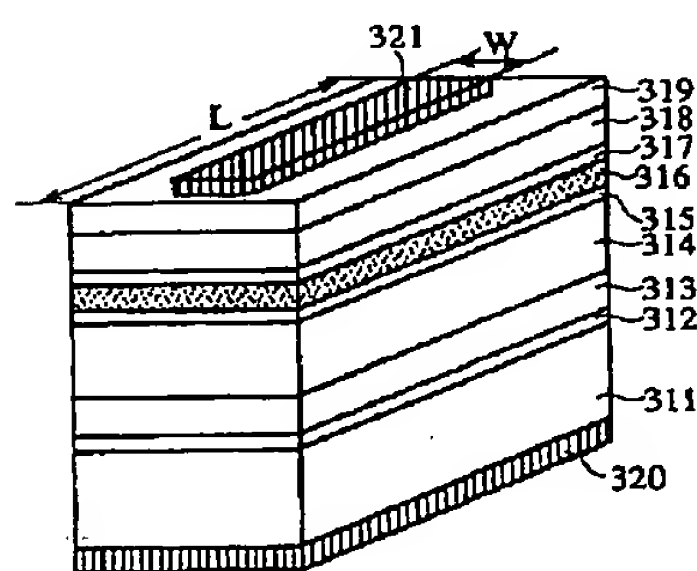
本発明の第3の実施の形態の
MQW構造半導体レーザの斜視図



- 111:n型SiC基板
- 112:AlGa_Nバッファ層
- 113:n型Ga_N中間層
- 114:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
- 115:アンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層
- 116:MQW活性層
- 117:p型Ga_N光ガイド層
- 118:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
- 119:p型Ga_Nコンタクト層
- 120:Ni電極
- 121:Ni電極

【图 15】

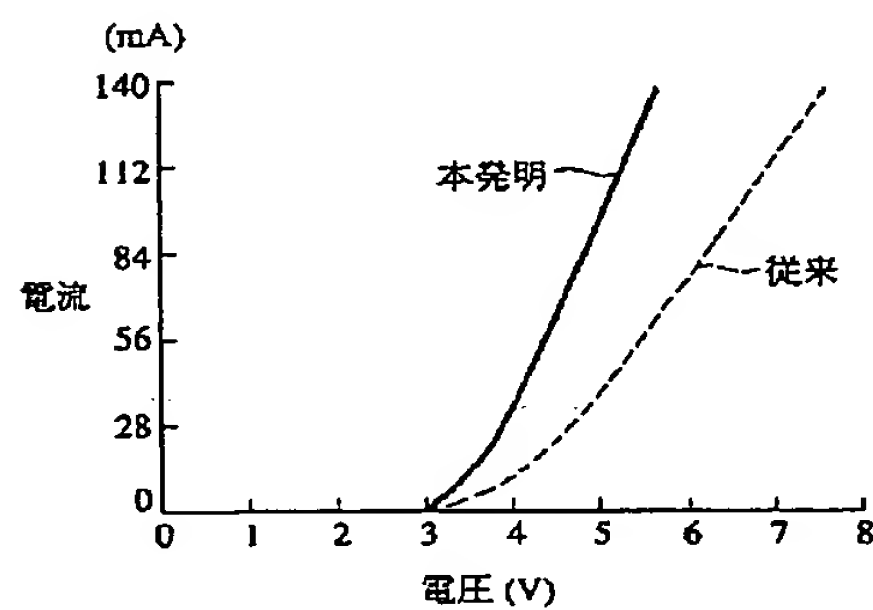
本発明の第12の実施の形態の短波長半導体レーザの斜視図



- | | |
|--|--|
| 311: n型SiC基板 | 317: p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラフト層 |
| 312: AlGaInバンプ層 | 318: p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラフト層 |
| 313: n型GaIn中間層 | 319: p型GaInコンタクト層 |
| 314: n型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラフト層 | 320: Ni電極 |
| 315: p型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ クラフト層 | 321: Ni電極 |
| 316: MQW活性層 | |

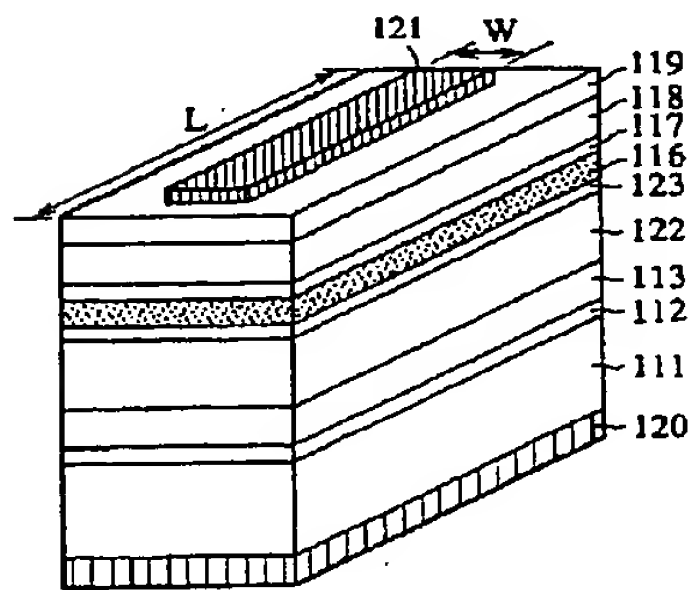
【图23】

本発明の第19の実施の形態における効果の説明図



【図7】

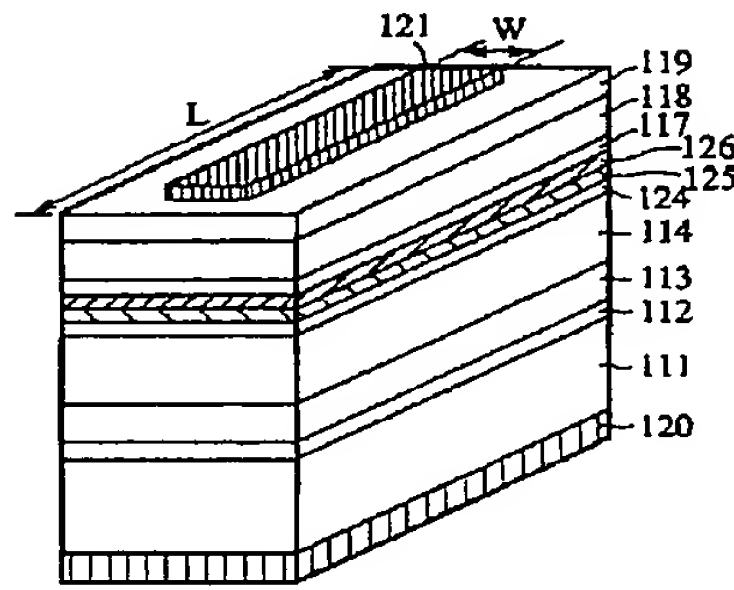
本発明の第4の実施の形態の
MQW構造半導体レーザの斜視図



111:n型SiC基板
112:AlGaInバッファ層
113:n型GaN中間層
116:MQW活性層
117:p型GaN光ガイド層
118:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
119:p型GaNコンタクト層
120:Ni電極
121:Ni電極
122:n型Al_{0.2}Ga_{0.8}Nクラッド層
123:アンドープGaN光ガイド層

【図8】

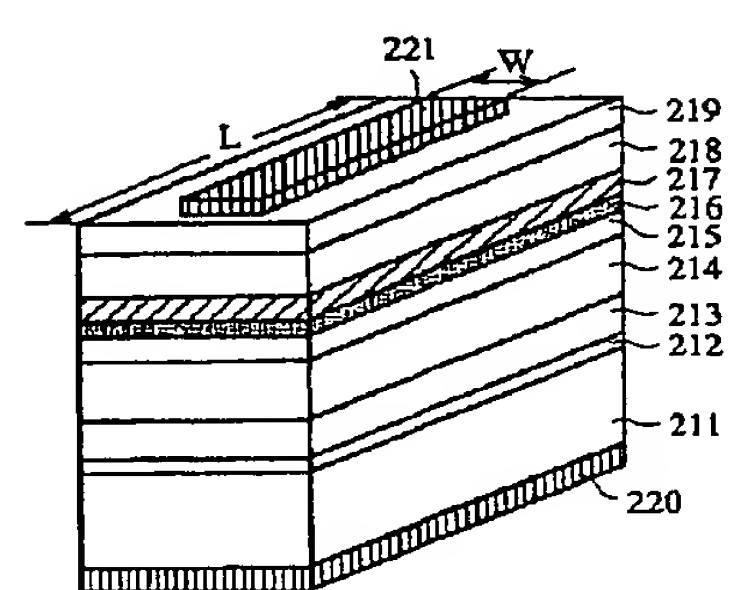
本発明の第5の実施の形態の
SQW構造半導体レーザの斜視図



111:n型SiC基板
112:AlGaInバッファ層
113:n型GaN中間層
114:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
117:p型GaN光ガイド層
118:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
119:p型GaNコンタクト層
120:Ni電極
121:Ni電極
124:アンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層
125:SQW活性層
126:p型Al_{0.2}Ga_{0.8}Nオーバーフロー防止層

【図9】

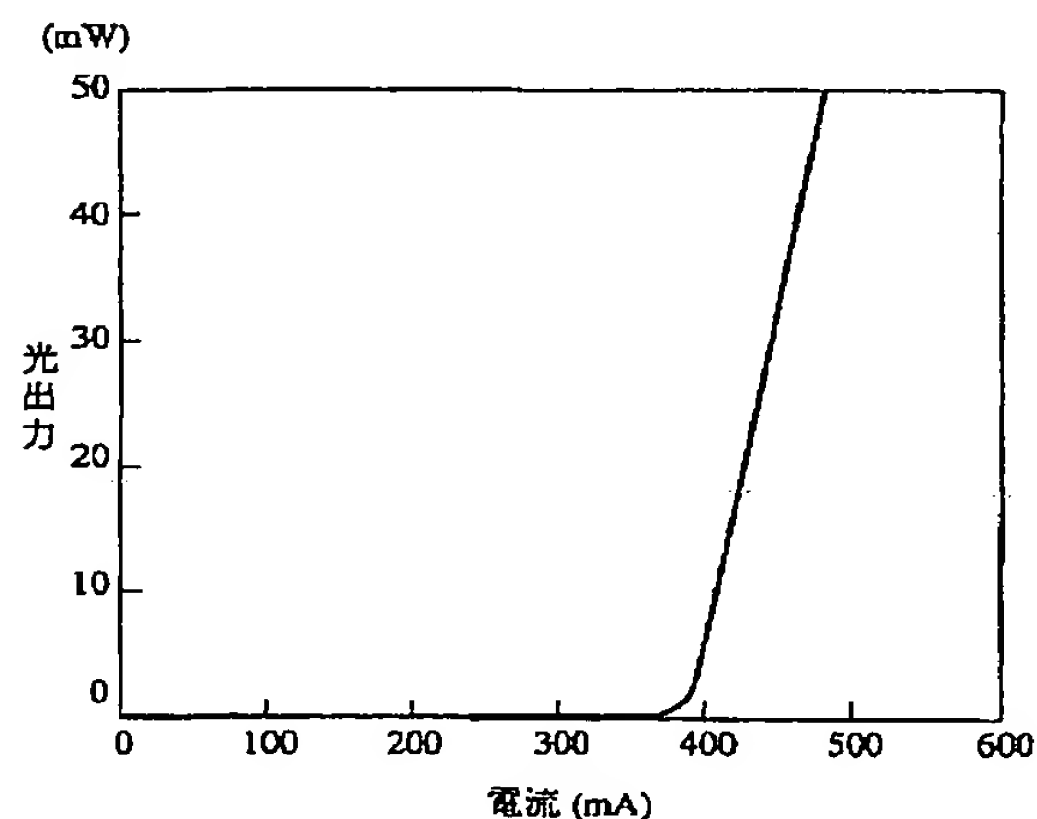
本発明の第6の実施の形態の
SQW半導体レーザの斜視図



211:n型SiC基板
212:AlGaInバッファ層
213:n型GaN中間層
214:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
215:アンドープAl_{0.05}Ga_{0.95}N光ガイド層
216:SQW活性層
217:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
218:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
219:p型GaNコンタクト層
220:Ni電極
221:Ni電極

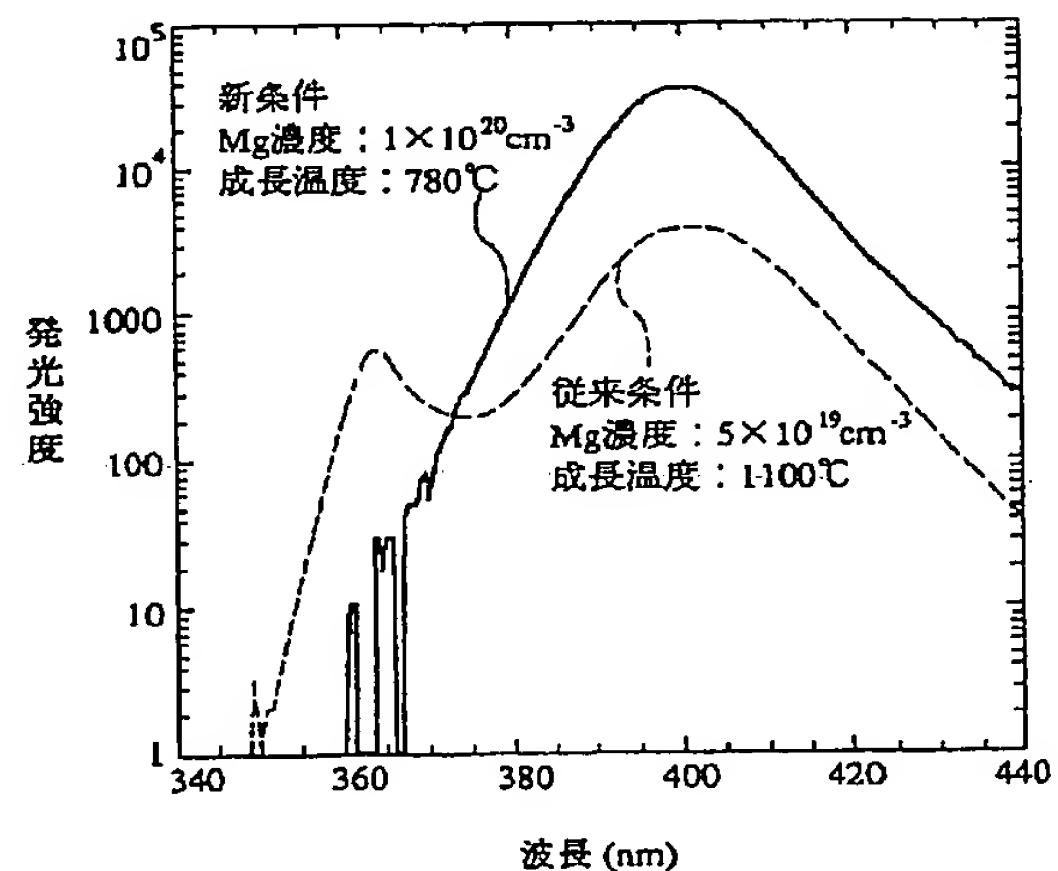
【図25】

本発明の第20の実施の形態のMQW半導体レーザの
電流—光出力特性の説明図



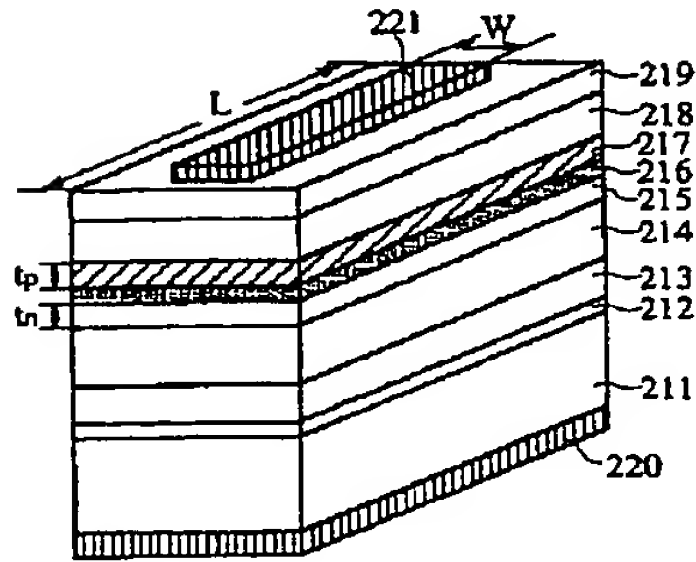
【図27】

表面発光型LEDにおける発光スペクトル強度の
構成条件依存性の説明図



【図10】

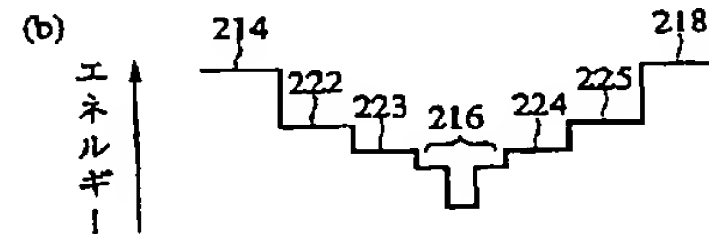
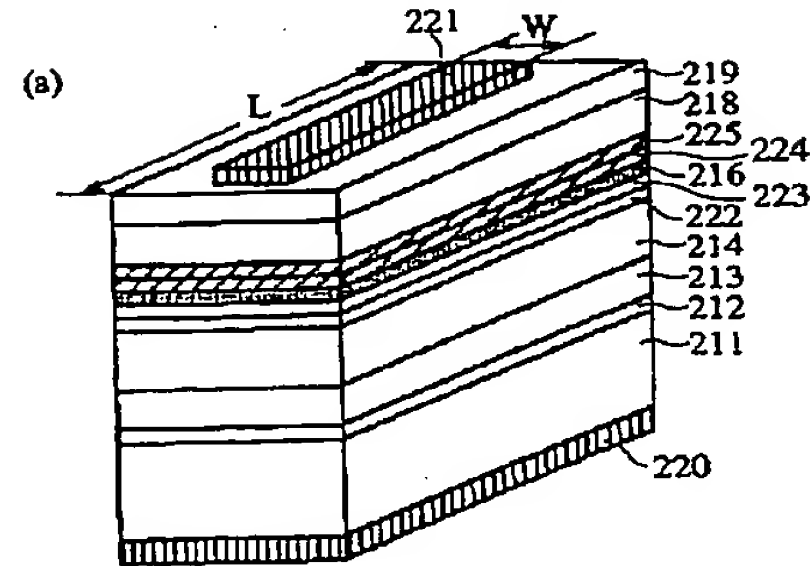
本発明の第7の実施の形態の
SQW半導体レーザの斜視図



211:n型SiC基板
212:AlGaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
213:n型GaIn^{0.15}N^{0.85}中間層
214:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
215:In^{0.15}Ga^{0.85}N光活性層
216:SQW活性層
217:In^{0.15}Ga^{0.85}N光活性層
218:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
219:p型GaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
220:Ni電極
221:Ni電極

【図11】

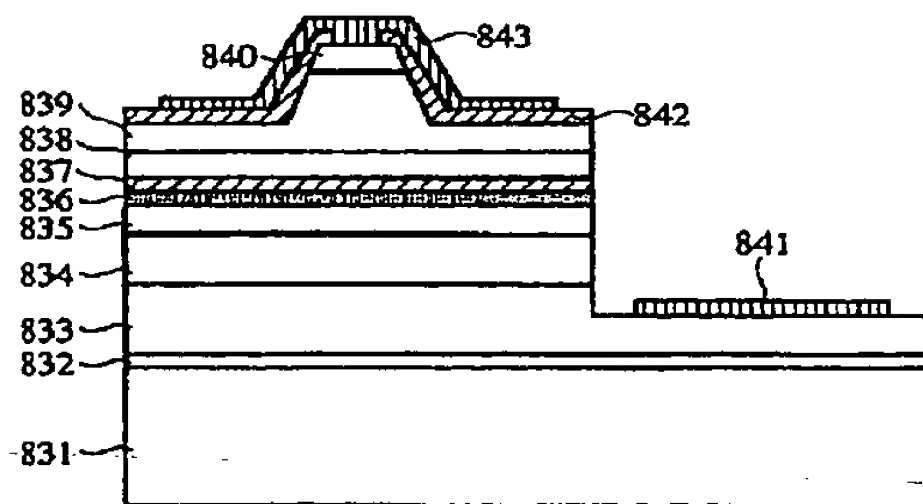
本発明の第8の実施の形態の
SQW半導体レーザの説明図



211:n型SiC基板
212:AlGaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
213:n型GaIn^{0.15}N^{0.85}中間層
214:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
216:SQW活性層
218:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
219:p型GaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
220:Ni電極
221:Ni電極
222:In^{0.15}Ga^{0.85}N光活性層
223:In^{0.03}Ga^{0.97}N光活性層
224:In^{0.03}Ga^{0.97}N光活性層
225:p型Al_{0.05}Ga_{0.95}N光活性層

【図32】

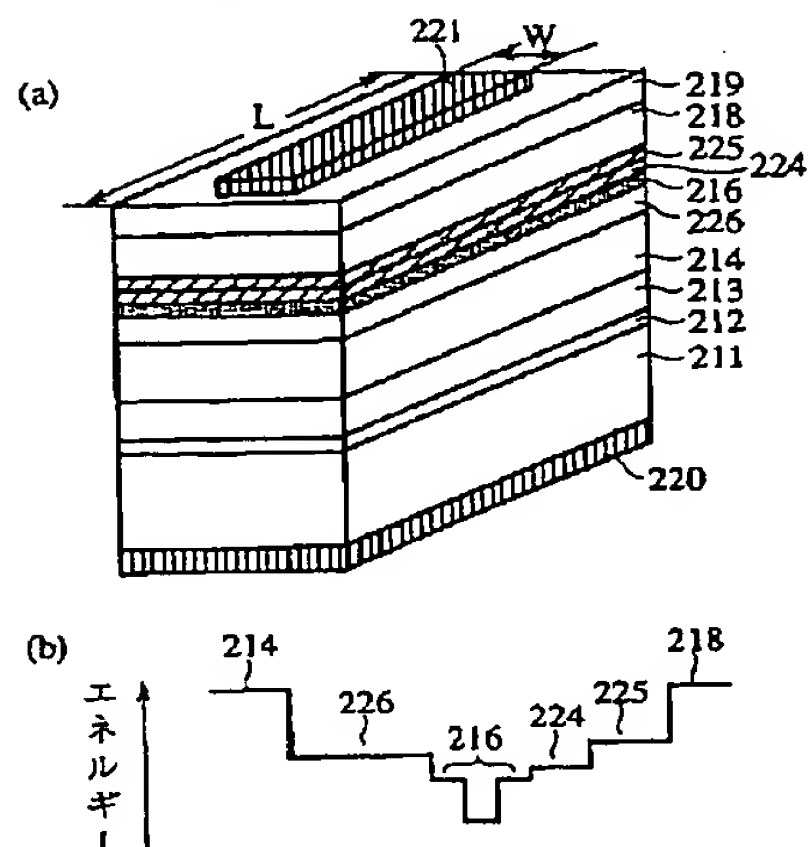
従来の短波長半導体レーザの説明図



831:GaAs基板
832:GaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
833:n型GaIn^{0.15}N^{0.85}中間層
834:n型Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層
835:n型GaIn^{0.15}N^{0.85}光活性層
836:MQW活性層
837:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
838:p型GaIn^{0.15}N^{0.85}光活性層
839:p型Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層
840:p型GaIn^{0.15}N^{0.85}クラッド層
841:n側電極
842:SiO₂膜
843:p側電極

【図12】

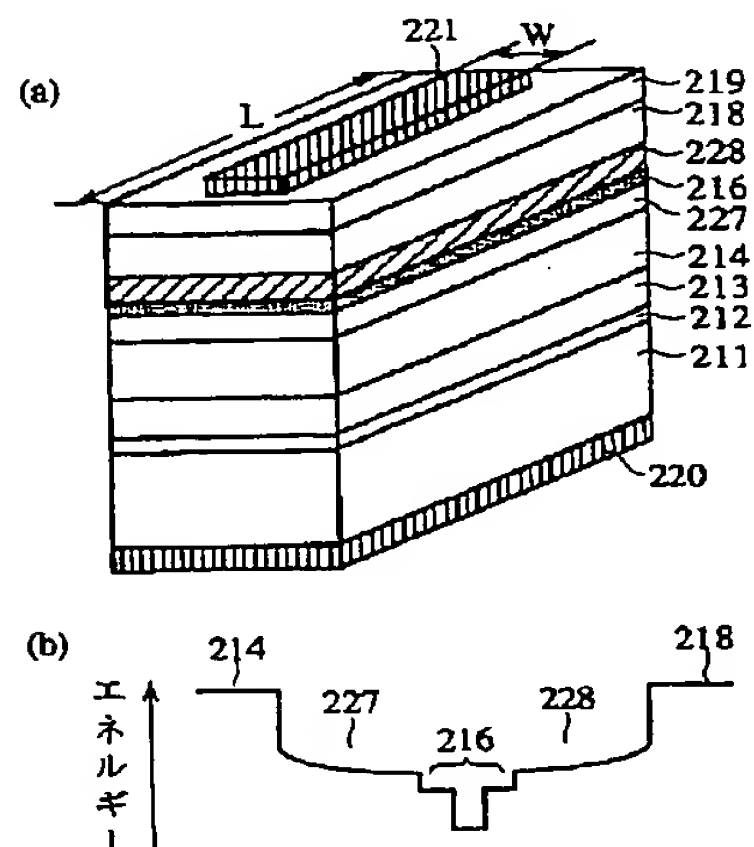
本発明の第9の実施の形態の
SQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 211: n型SiC基板 | 224: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 212: AlGaInハット層 | 225: p型Al _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 |
| 213: n型GaIn中間層 | 226: p型Al _{0.05} Ga _{0.95} N光ガイド層 |
| 214: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 227: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 216: SQW活性層 | 228: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 218: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | |
| 219: p型GaInコンタクト層 | |
| 220: Ni電極 | |
| 221: Ni電極 | |

【図13】

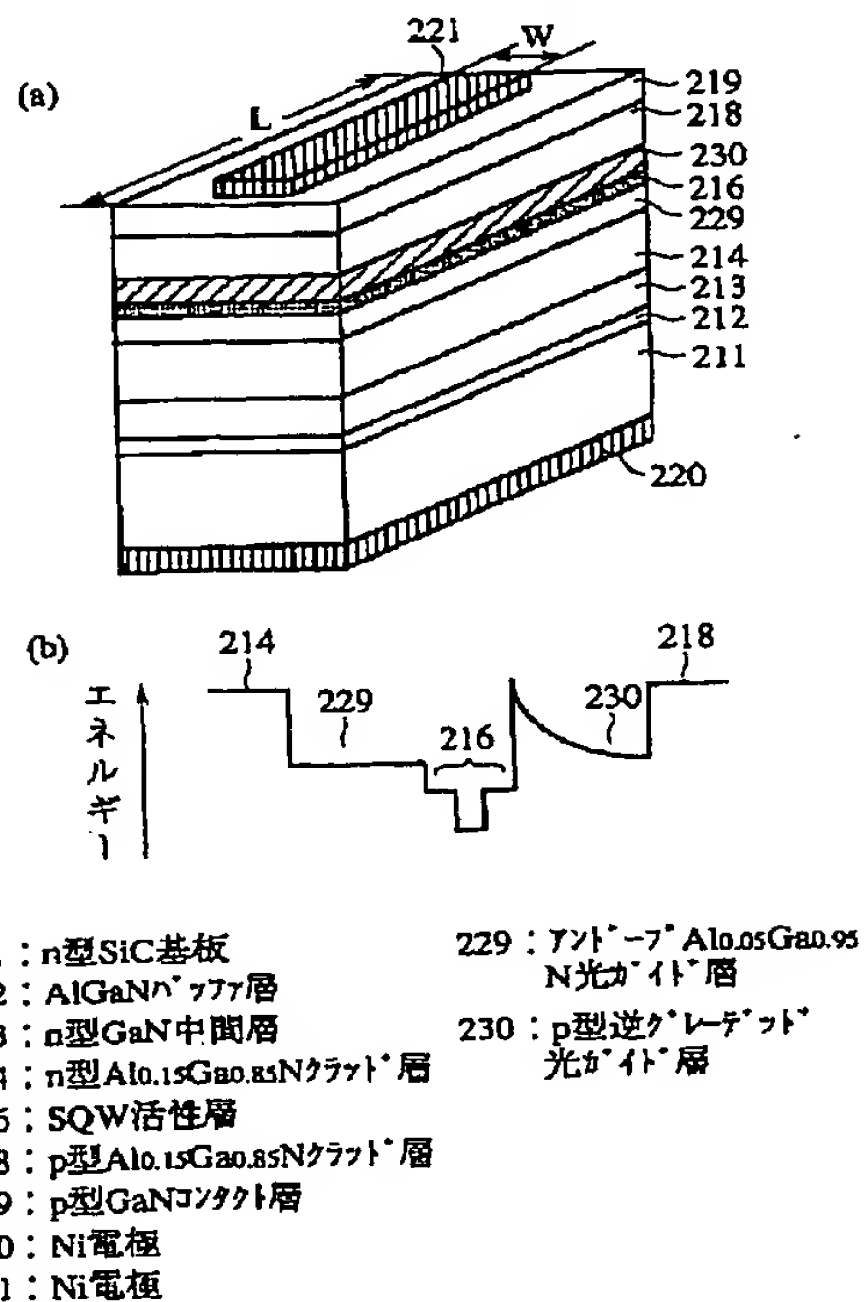
本発明の第10の実施の形態の
SQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 211: n型SiC基板 | 227: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 212: AlGaInハット層 | 228: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 213: n型GaIn中間層 | |
| 214: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | |
| 216: SQW活性層 | |
| 218: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | |
| 219: p型GaInコンタクト層 | |
| 220: Ni電極 | |
| 221: Ni電極 | |

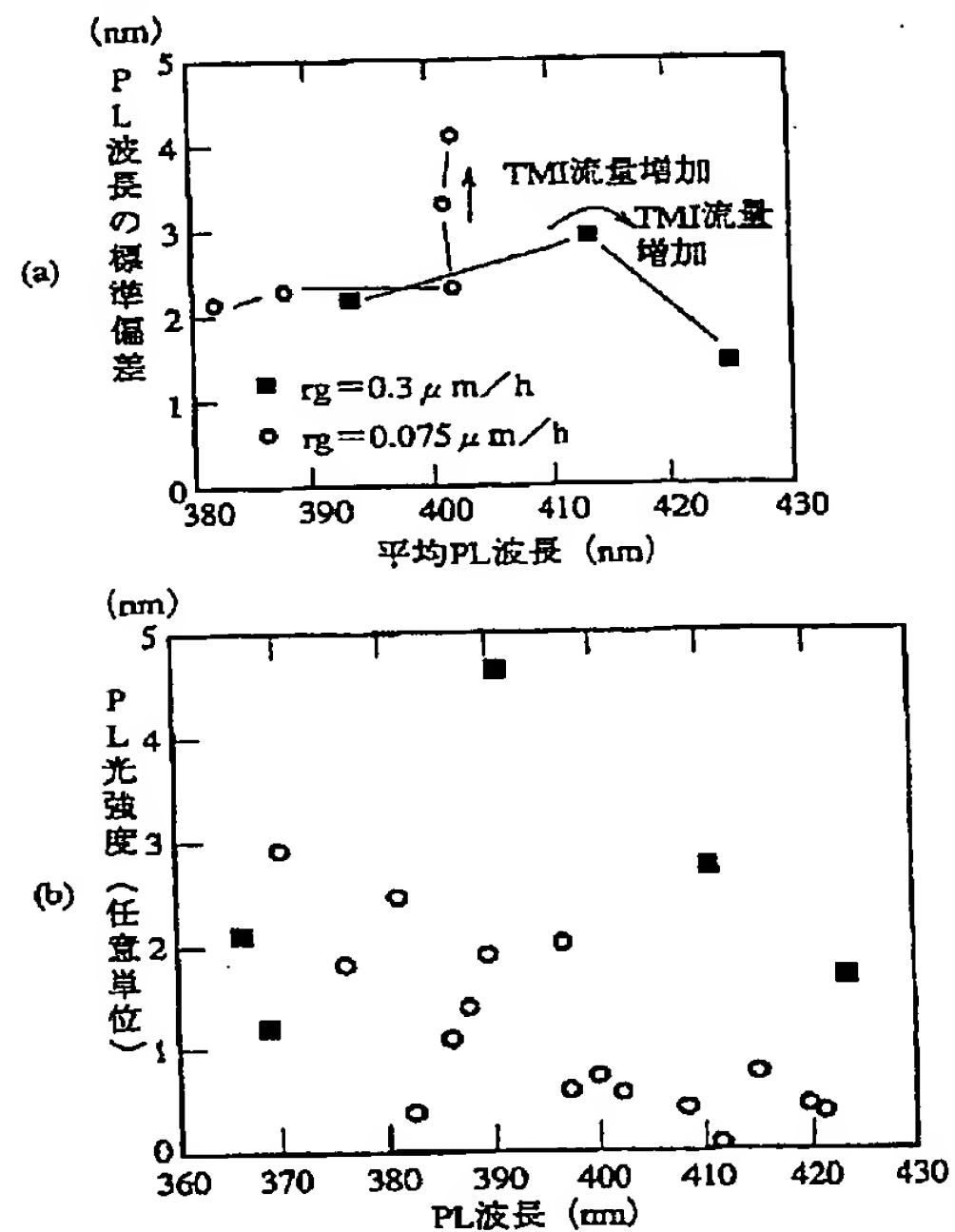
【図14】

本発明の第11の実施の形態の
SQW半導体レーザの説明図



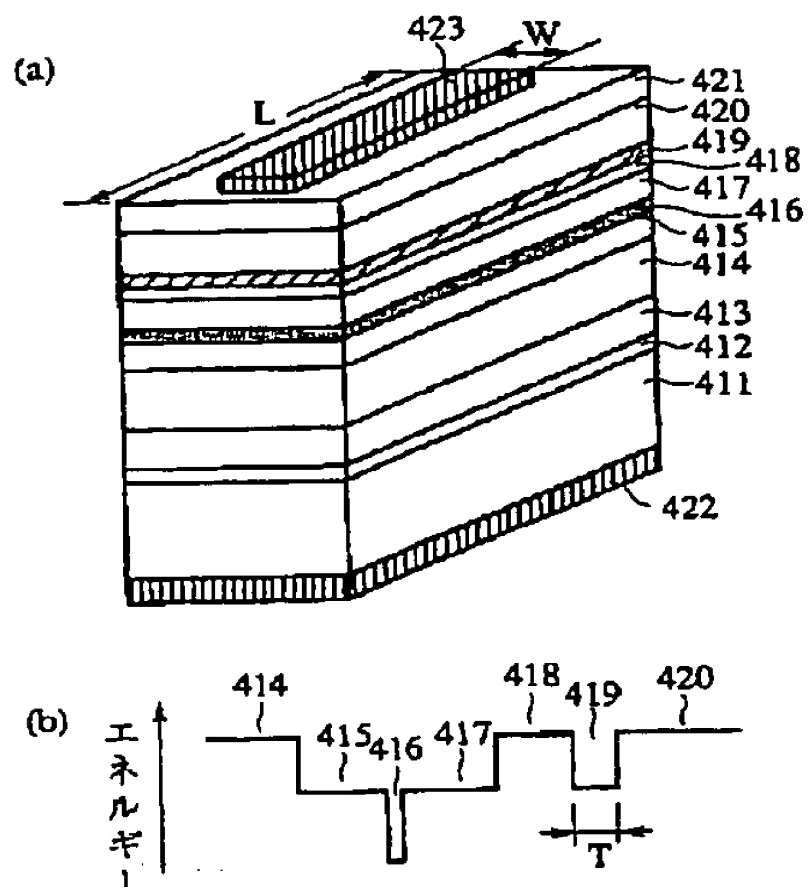
【図16】

本発明の第12の実施の形態におけるPL波長の標準偏差
及びPL光強度の成長速度依存性の説明図



【図17】

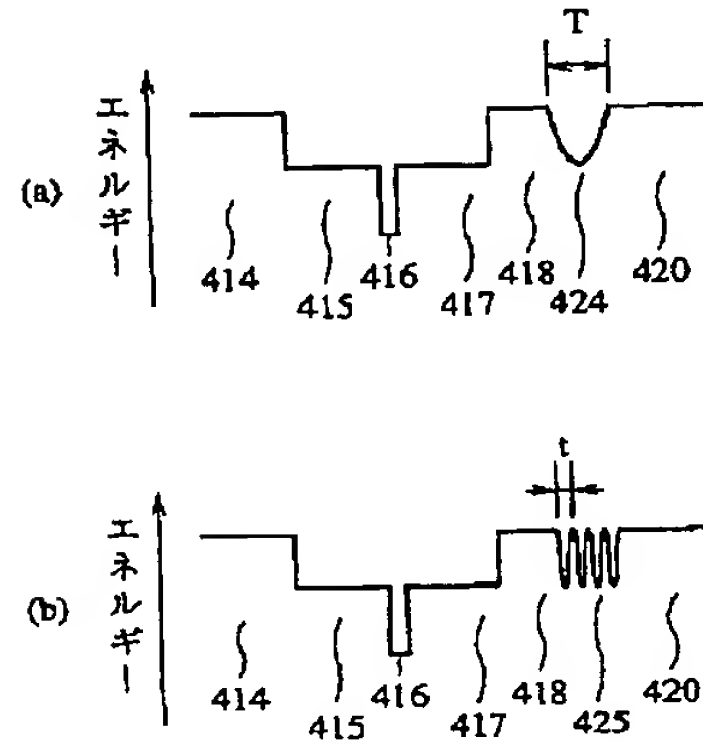
本発明の第13の実施の形態の説明図



- | | |
|---|---|
| 411: n型SiC基板 | 418: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 412: AlGaInハット層 | 419: p型GaIn中間層 |
| 413: n型GaIn中間層 | 420: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 414: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 421: p型GaInコンタクト層 |
| 415: 700-700 nm GaN光ガイド層 | 422: Ni電極 |
| 416: SQW活性層 | 423: Ni電極 |
| 417: 700-700 nm GaN光ガイド層 | |

【図18】

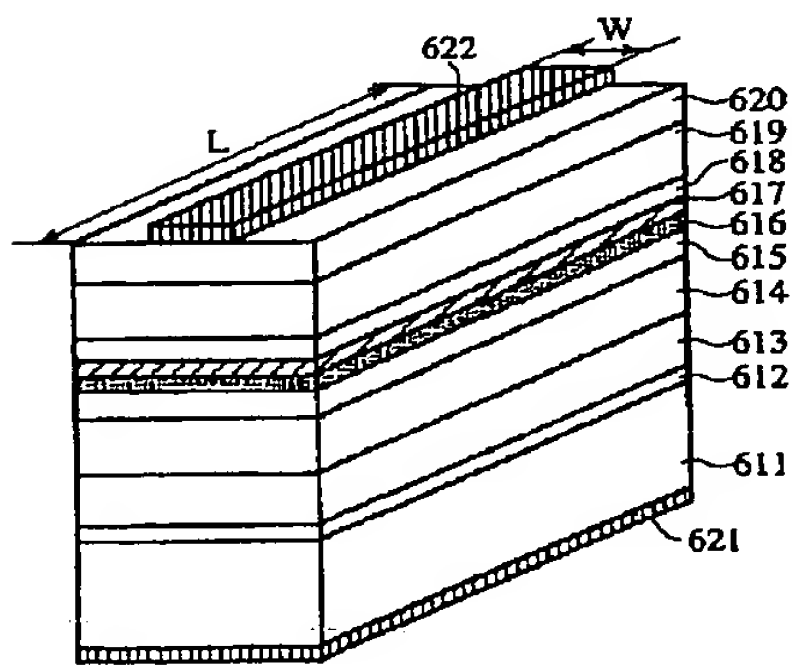
本発明の第14及び第15の実施の形態の説明図



- | |
|---|
| 414: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 415: 700-700 nm GaN光ガイド層 |
| 416: SQW活性層 |
| 417: 700-700 nm GaN光ガイド層 |
| 418: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 420: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 424: クラッド中間層 |
| 425: 多層構造中間層 |

【図21】

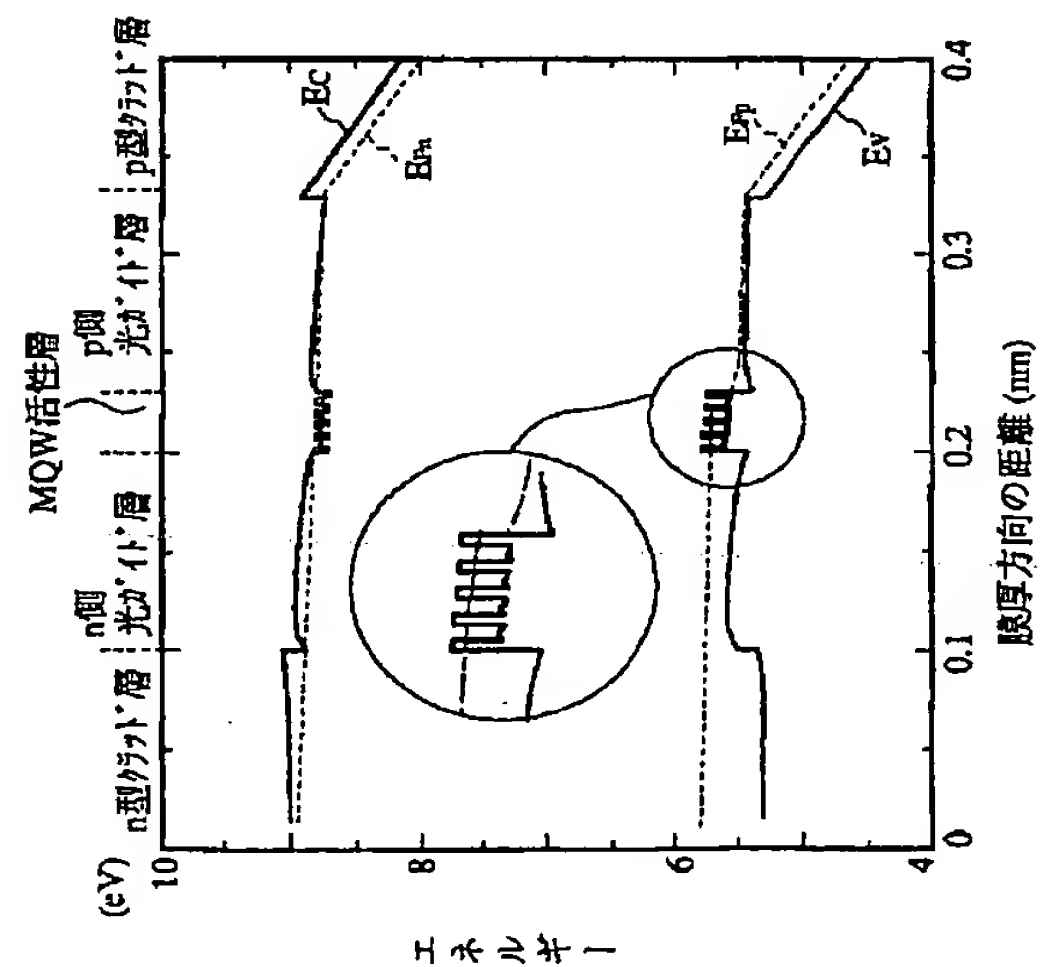
本発明の第18の実施の形態のMQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 611: n型SiC基板 | 617: 700-700 nm Al _{0.15} Ga _{0.85} N |
| 612: AlGaInハット層 | エレクトロニック層 |
| 613: n型GaIn中間層 | 618: p型GaIn光ガイド層 |
| 614: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 | 619: p型Al _{0.09} Ga _{0.91} N |
| 615: 700-700 nm GaN光ガイド層 | クラッド層 |
| 616: MQW活性層 | 620: p型GaInコンタクト層 |
| | 621: Ni電極 |
| | 622: Ni電極 |

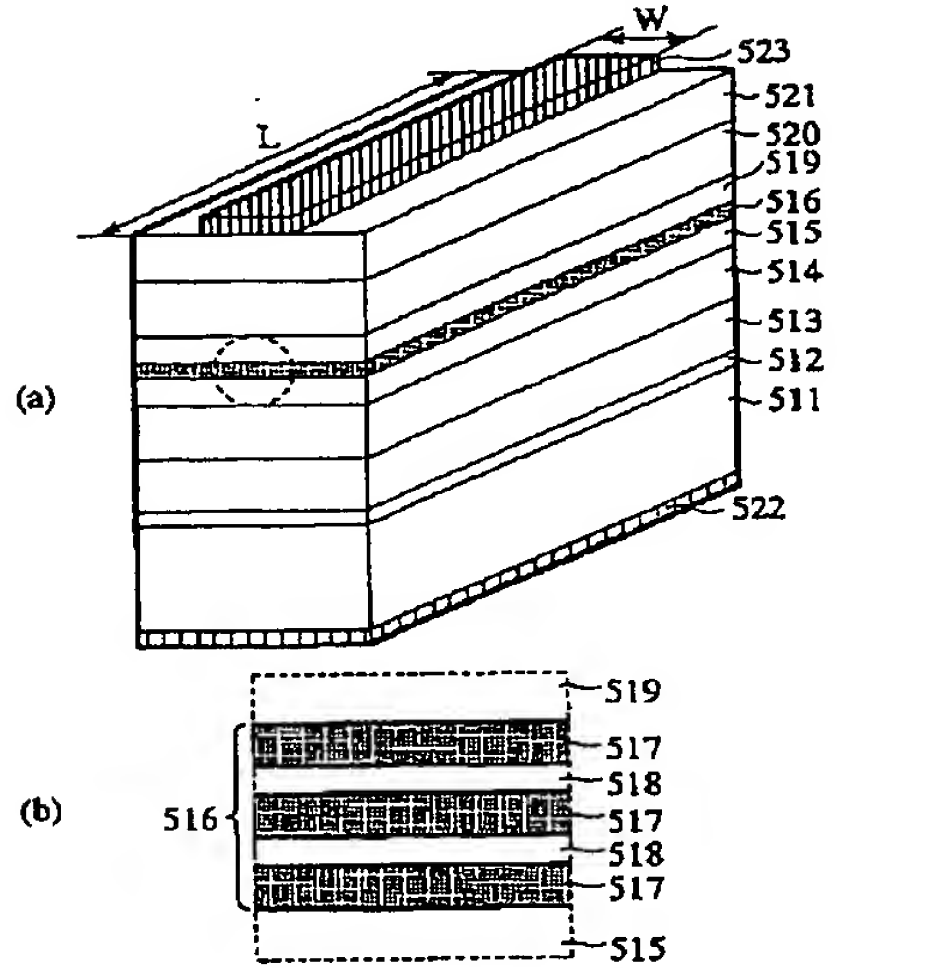
【図33】

従来のMQW半導体レーザの発振時のバンドダイアグラム



【図19】

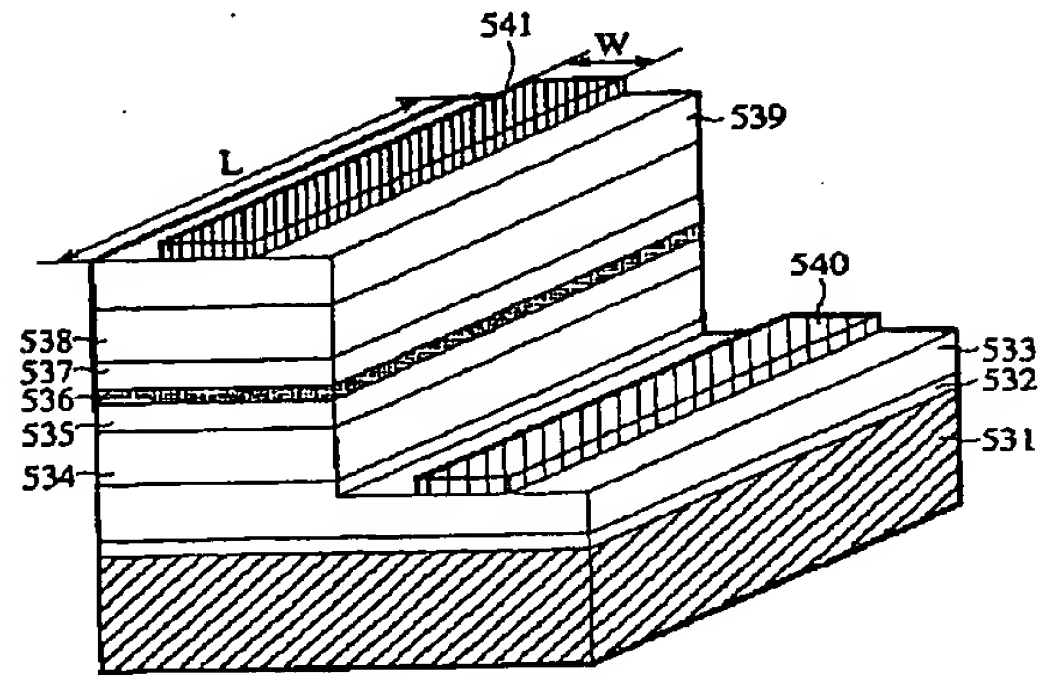
本発明の第16の実施の形態の
MQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 511: n型SiC基板 | 518: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層 |
| 512: AlGaInバリア層 | 519: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層 |
| 513: n型GaIn中間層 | 520: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 514: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 521: p型GaInコンタクト層 |
| 515: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層 | 522: Ni電極 |
| 516: MQW活性層 | 523: Ni電極 |
| 517: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ バリア層 | |

【図20】

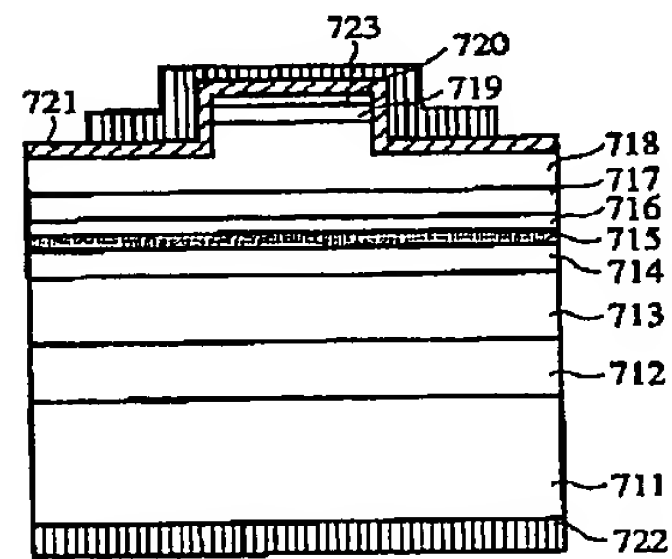
本発明の第17の実施の形態の
MQW半導体レーザの斜視図



- | | |
|---|---|
| 531: SiC基板 | 537: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層 |
| 532: GaIn低温バリア層 | 538: p型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 |
| 533: n型GaIn中間層 | 539: p型GaInコンタクト層 |
| 534: n型Al _{0.15} Ga _{0.85} Nクラッド層 | 540: Ti電極 |
| 535: $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 光ガイド層 | 541: Ni電極 |
| 536: MQW活性層 | |

【図24】

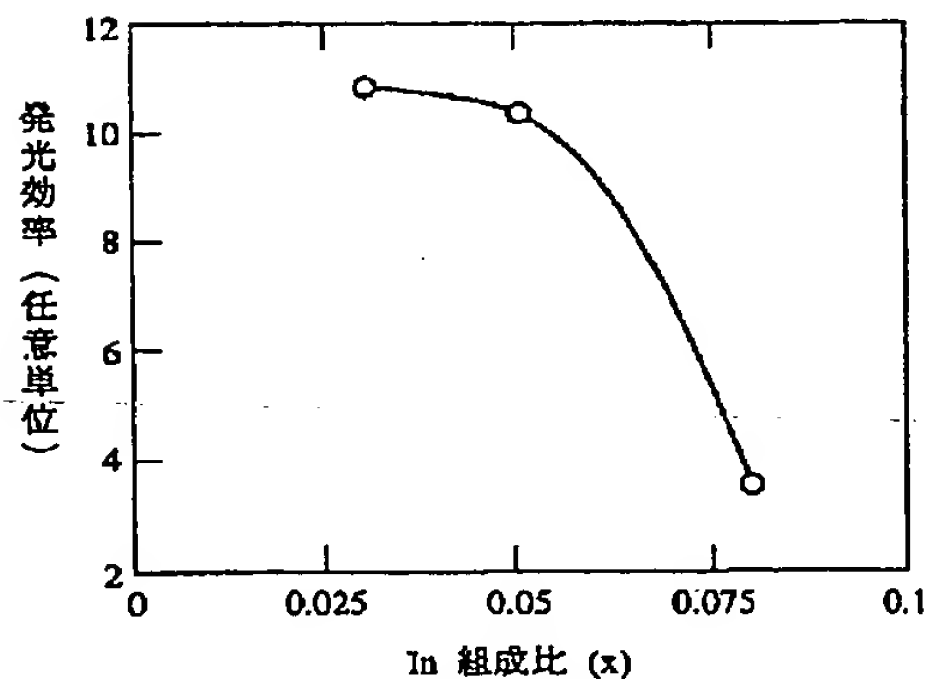
本発明の第20の実施の形態の
MQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 711: n型SiC基板 | 717: p型GaIn光ガイド層 |
| 712: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nバリア層 | 718: p型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 |
| 713: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 | 719: p型GaIn第1コンタクト層 |
| 714: n型GaIn光ガイド層 | 720: p型GaIn第2コンタクト層 |
| 715: InGaNMW活性層 | 721: SiO ₂ 膜 |
| 716: p型Al _{0.18} Ga _{0.82} Nエレクトロニック層 | 722: n側電極 |
| | 723: p側電極 |

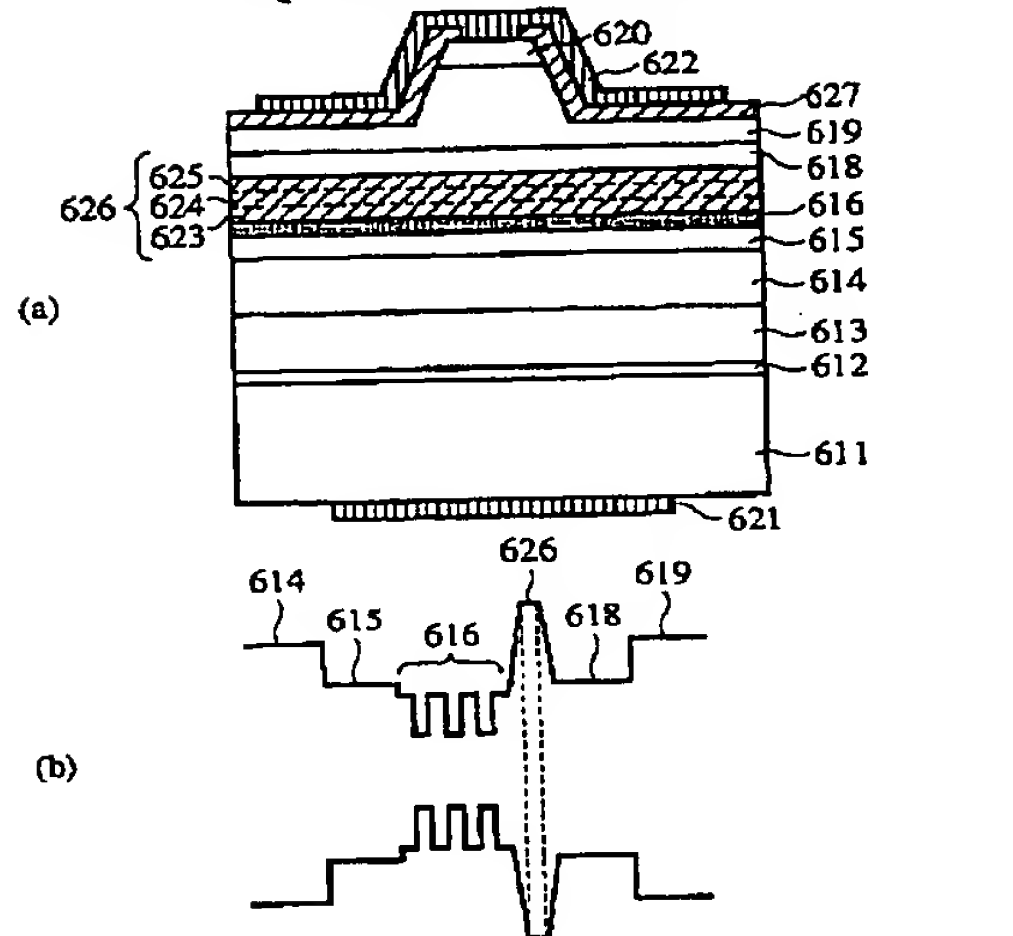
【図39】

量子井戸構造活性層の発光効率の
 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ バリア層のIn組成比依存性の説明図



【図22】

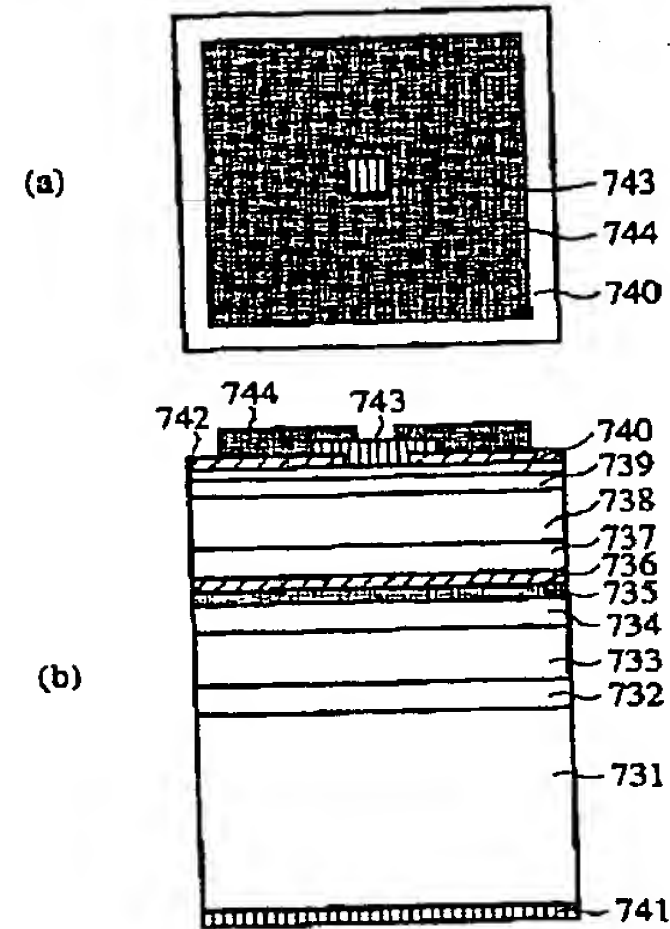
本発明の第19の実施の形態の
MQW半導体レーザの説明図



- | | |
|---|---|
| 611: n型SiC基板 | 620: p型Ga _{0.99} Nコンタクト層 |
| 612: AlGa _{0.09} Nバッファ層 | 621: Ni電極 |
| 613: n型Ga _{0.99} N中間層 | 622: Ni電極 |
| 614: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 | 623: p型クレーツトAlGa _{0.99} N層 |
| 615: p型Al _{0.18} Ga _{0.82} N光ガイド層 | 624: p型Al _{0.18} Ga _{0.82} N層 |
| 616: MQW活性層 | 625: p型クレーツトAlGa _{0.99} N層 |
| 618: p型Ga _{0.99} N光ガイド層 | 626: p型エレクトロンブロック層 |
| 619: p型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 | 627: SiO ₂ 膜 |

【図26】

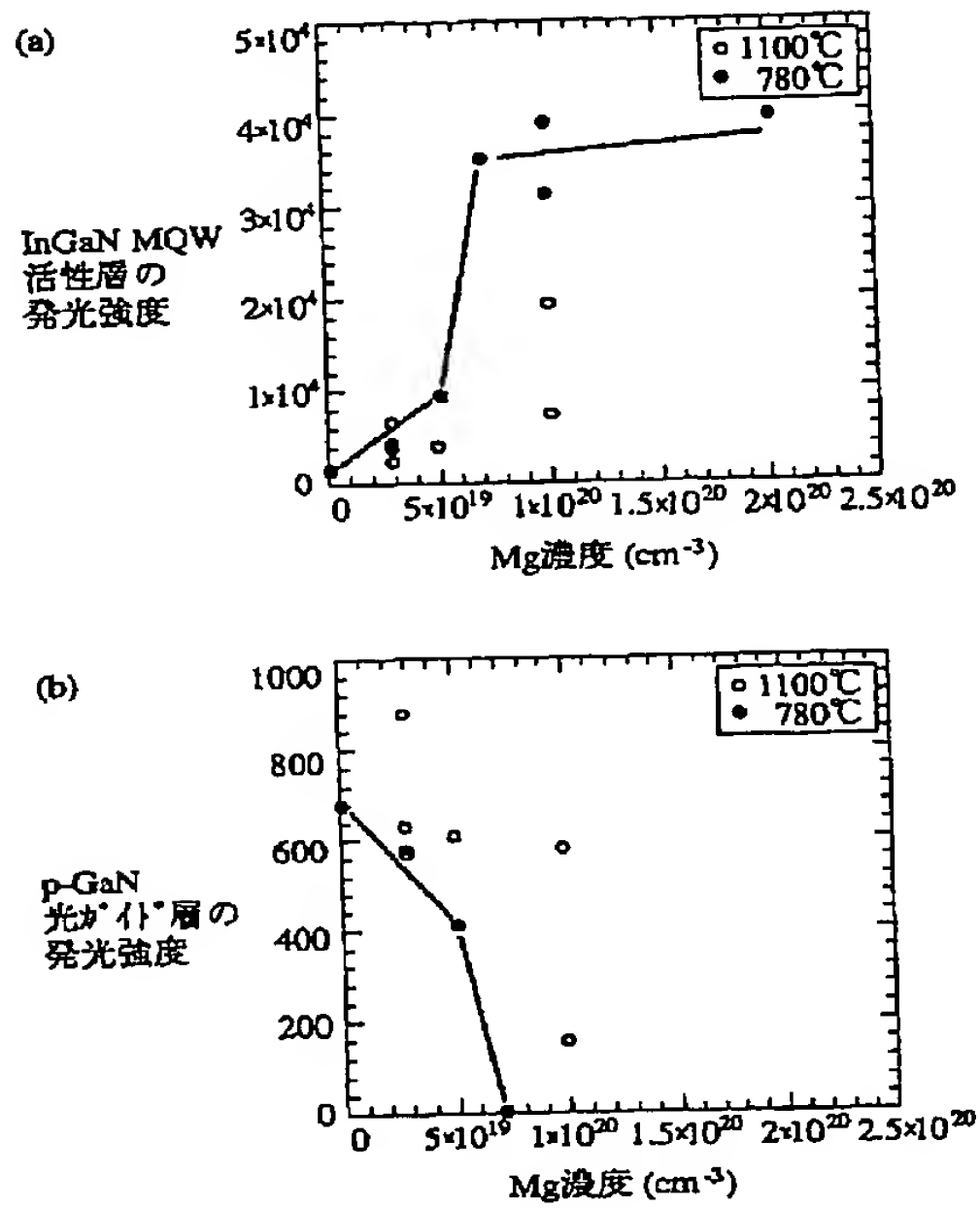
本発明の第20の実施の形態における効果を確認する
ために作製した表面発光型LEDの説明図



- | | |
|---|---|
| 731: n型SiC基板 | 737: p型Ga _{0.99} N光ガイド層 |
| 732: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nバッファ層 | 738: p型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 |
| 733: n型Al _{0.09} Ga _{0.91} Nクラッド層 | 739: p型Ga _{0.99} N第1コンタクト層 |
| 734: n型Ga _{0.99} N光ガイド層 | 740: p型Ga _{0.99} N第2コンタクト層 |
| 735: InGa _{0.99} NMQW活性層 | 741: n側電極 |
| 736: p型Al _{0.18} Ga _{0.82} Nエレクトロンブロック層 | 742: SiO ₂ 膜 |
| | 743: 半透明電極 |
| | 744: 半透明電極 |

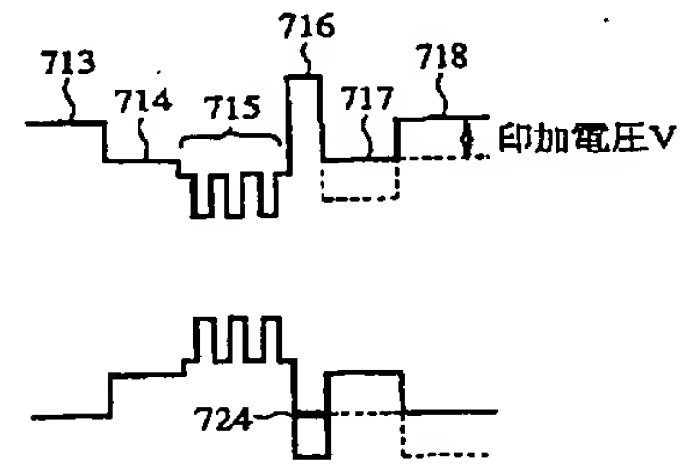
【図28】

表面発光型LEDにおける発光強度の
Mg濃度依存性の説明図



【図29】

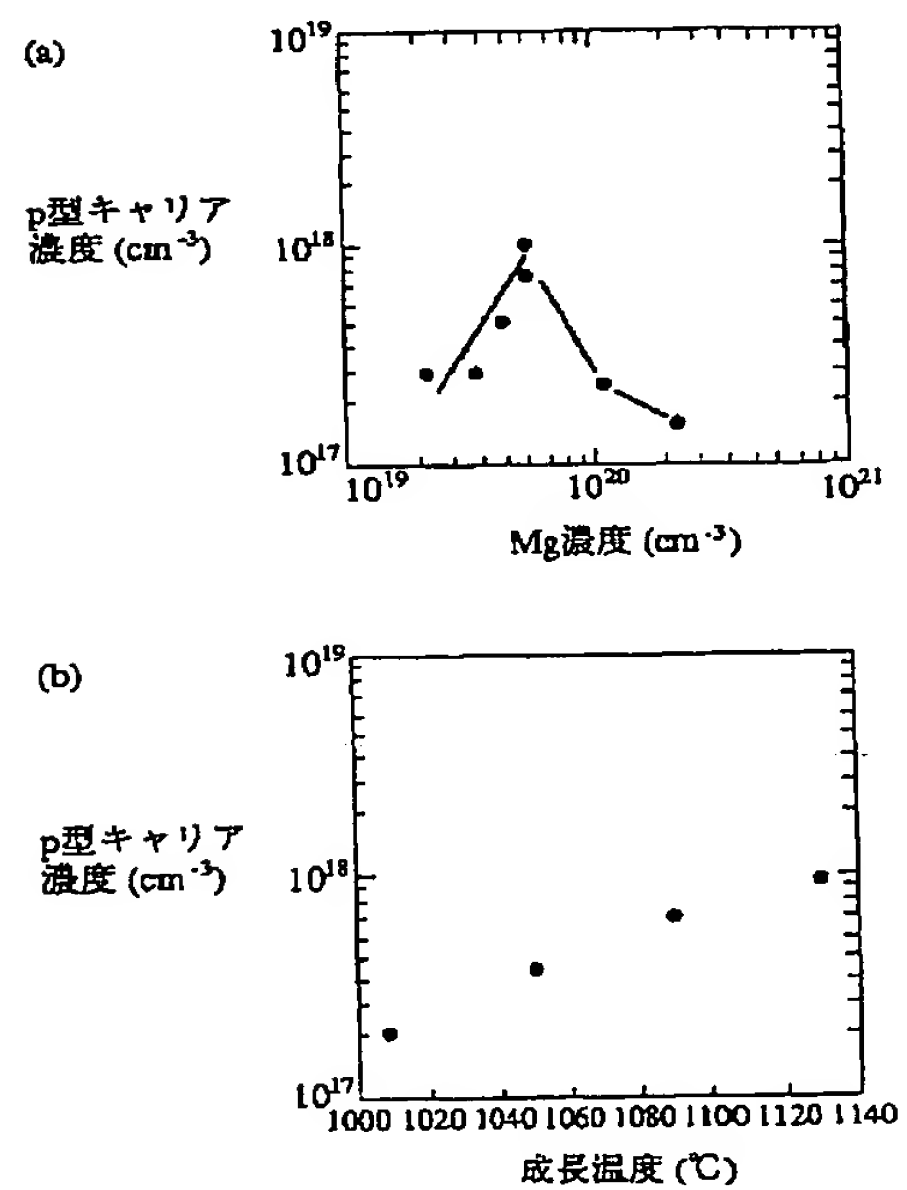
本発明の第20の実施の形態のMQW半導体レーザの
MQW活性層近傍のバンドダイヤグラム



- 713: n型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層
- 714: n型Ga_{0.99}N光ガイド層
- 715: InGa_{0.99}N MQW活性層
- 716: p型Al_{0.18}Ga_{0.82}Nエレクトロンブロック層
- 717: p型Ga_{0.99}N光ガイド層
- 718: p型Al_{0.09}Ga_{0.91}Nクラッド層
- 724: 不純物準位

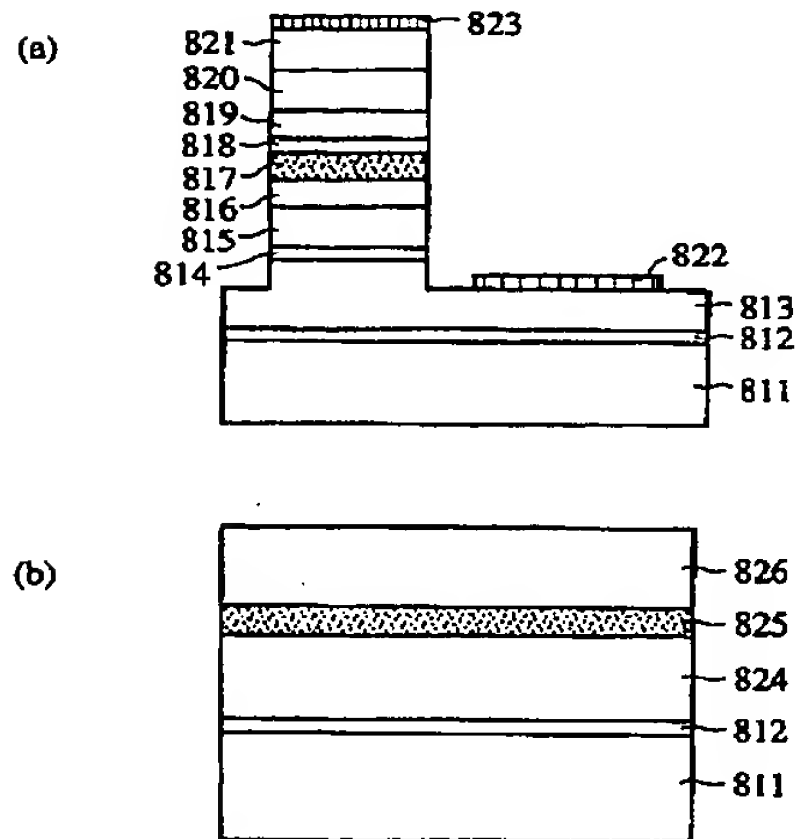
【図30】

p型Ga_{0.99}N層におけるp型キャリア濃度の
構成条件依存性の説明図



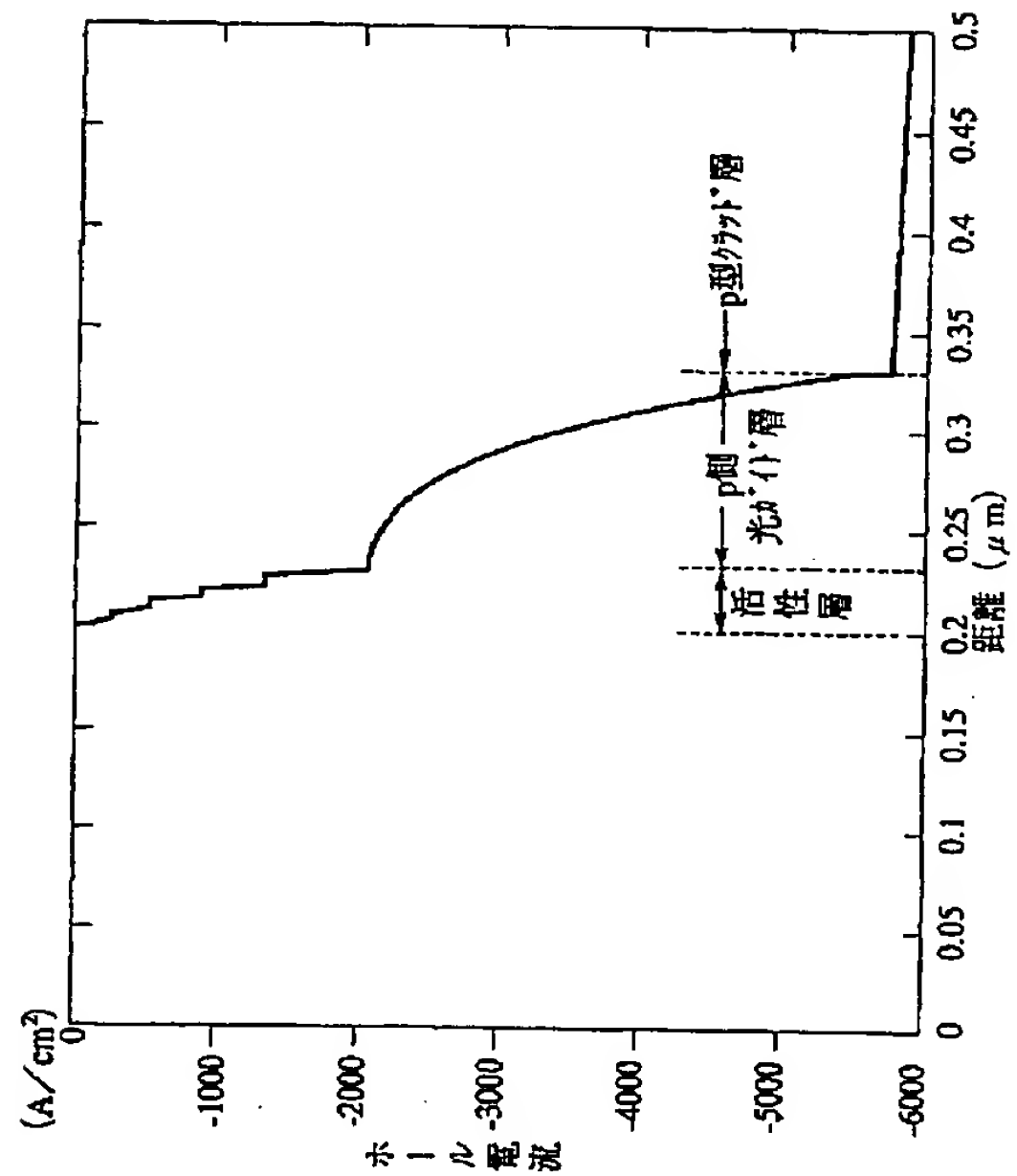
【図31】

従来の短波長半導体発光素子の説明図

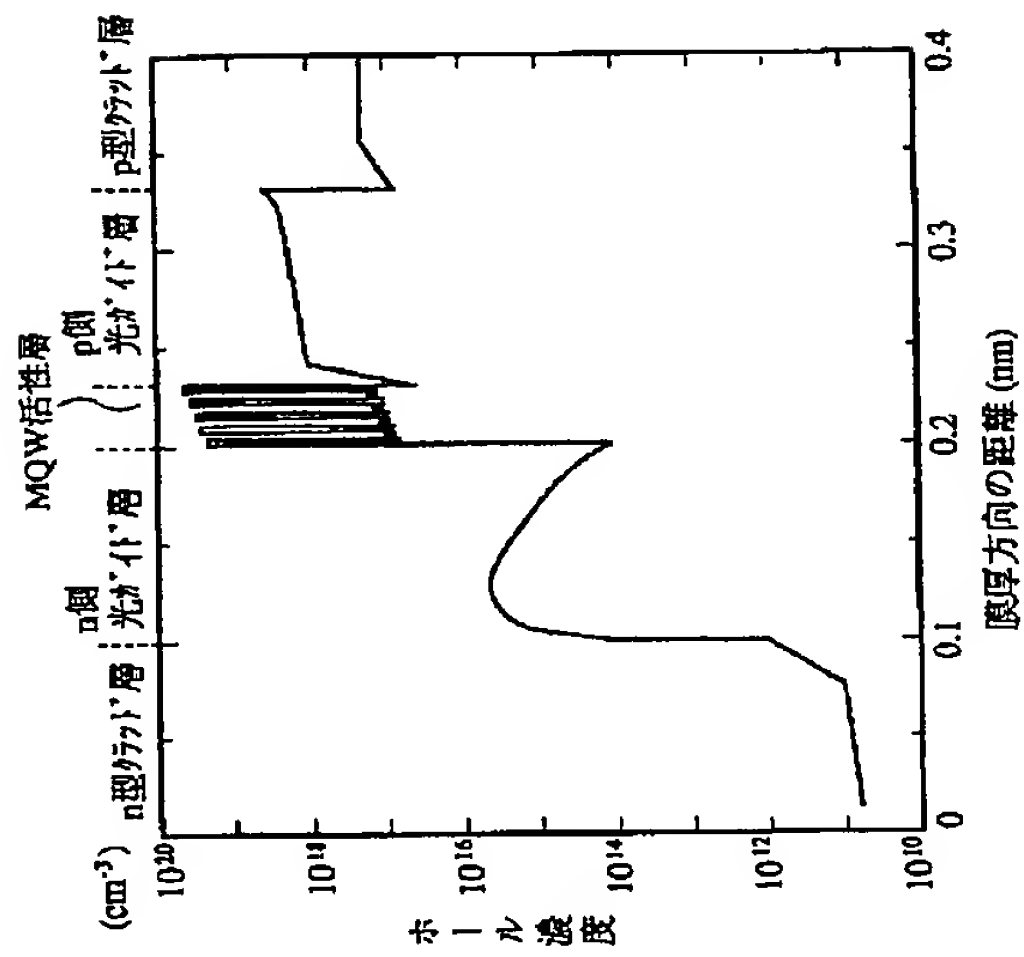


811:サファイア基板
 812:GaNバッファ層
 813:n型GaNバッファ層
 814:n型In_{0.1}Ga_{0.9}N層
 815:n型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
 816:n型GaN光ガイド層
 817:InGaNMW活性層
 818:p型Al_{0.2}Ga_{0.8}N層
 819:p型GaN光ガイド層
 820:p型Al_{0.15}Ga_{0.85}Nクラッド層
 821:p型GaNコンタクト層
 822:n側電極
 823:p側電極
 824:n型GaN層
 825:In_{0.15}Ga_{0.85}N活性層
 826:p型GaN層

【図34】

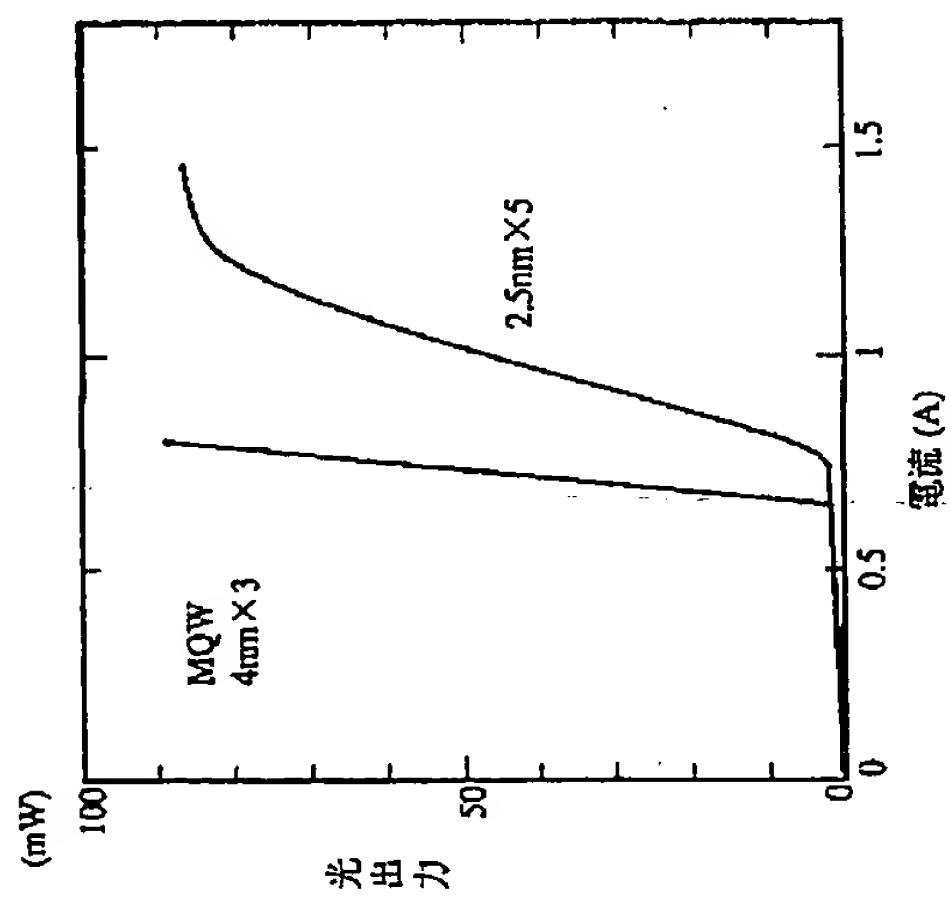
従来のMQW構造短波長半導体レーザにおける
ホール電流の層位置依存性の説明図

【図35】

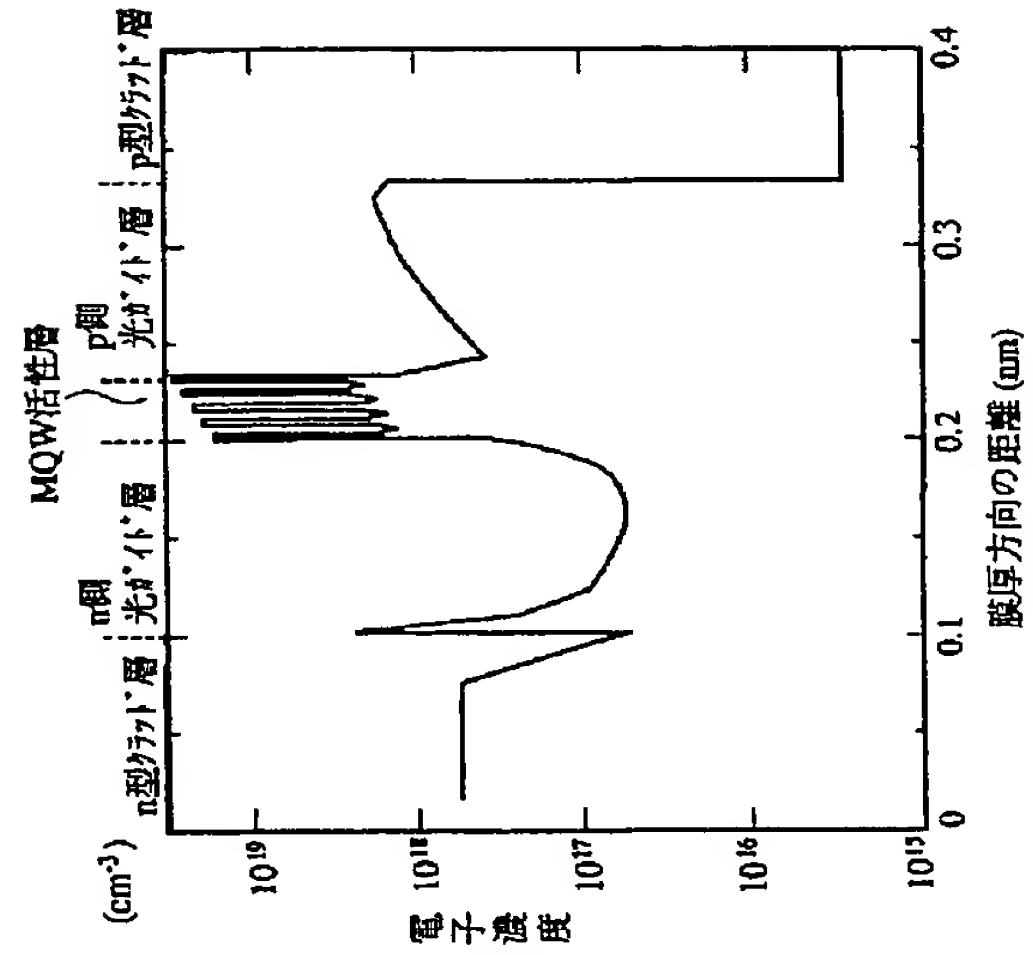
従来のMQW半導体レーザの発振時の
ホール密度分布の説明図

【図38】

従来のMQW半導体レーザの光出力—電流特性の説明図

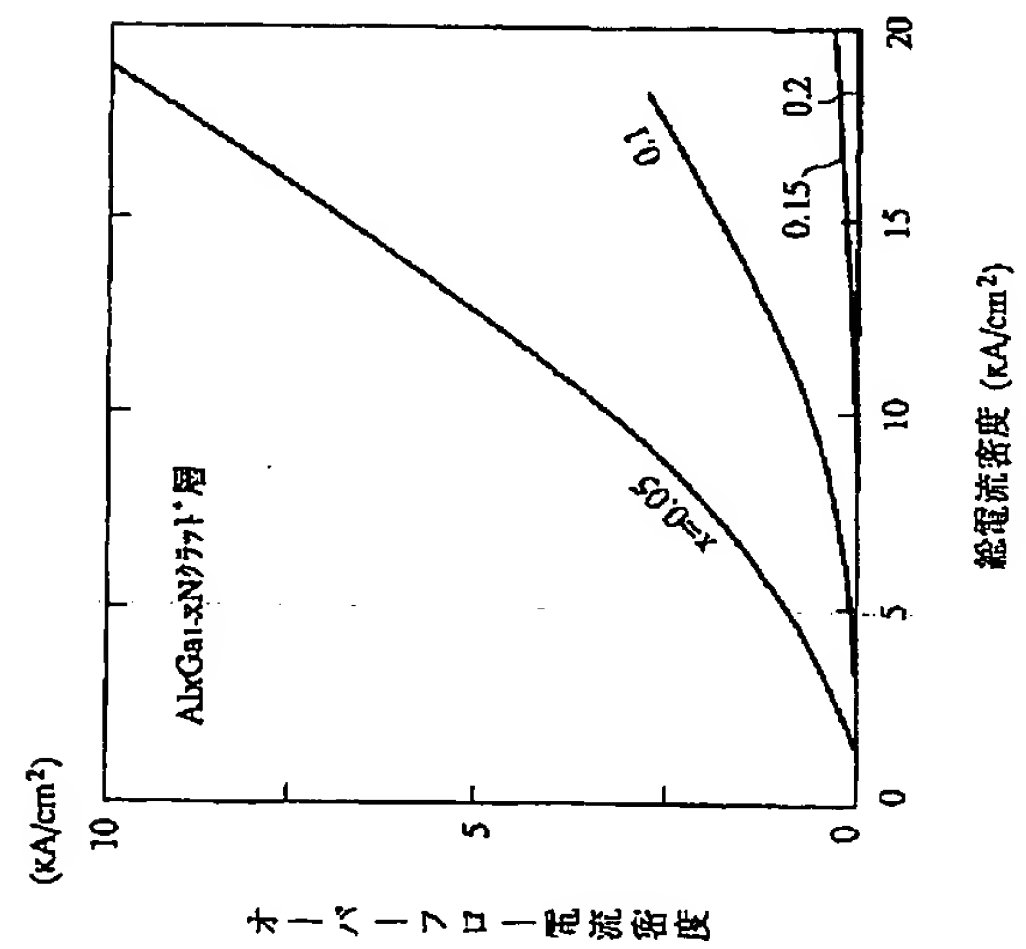


【図36】

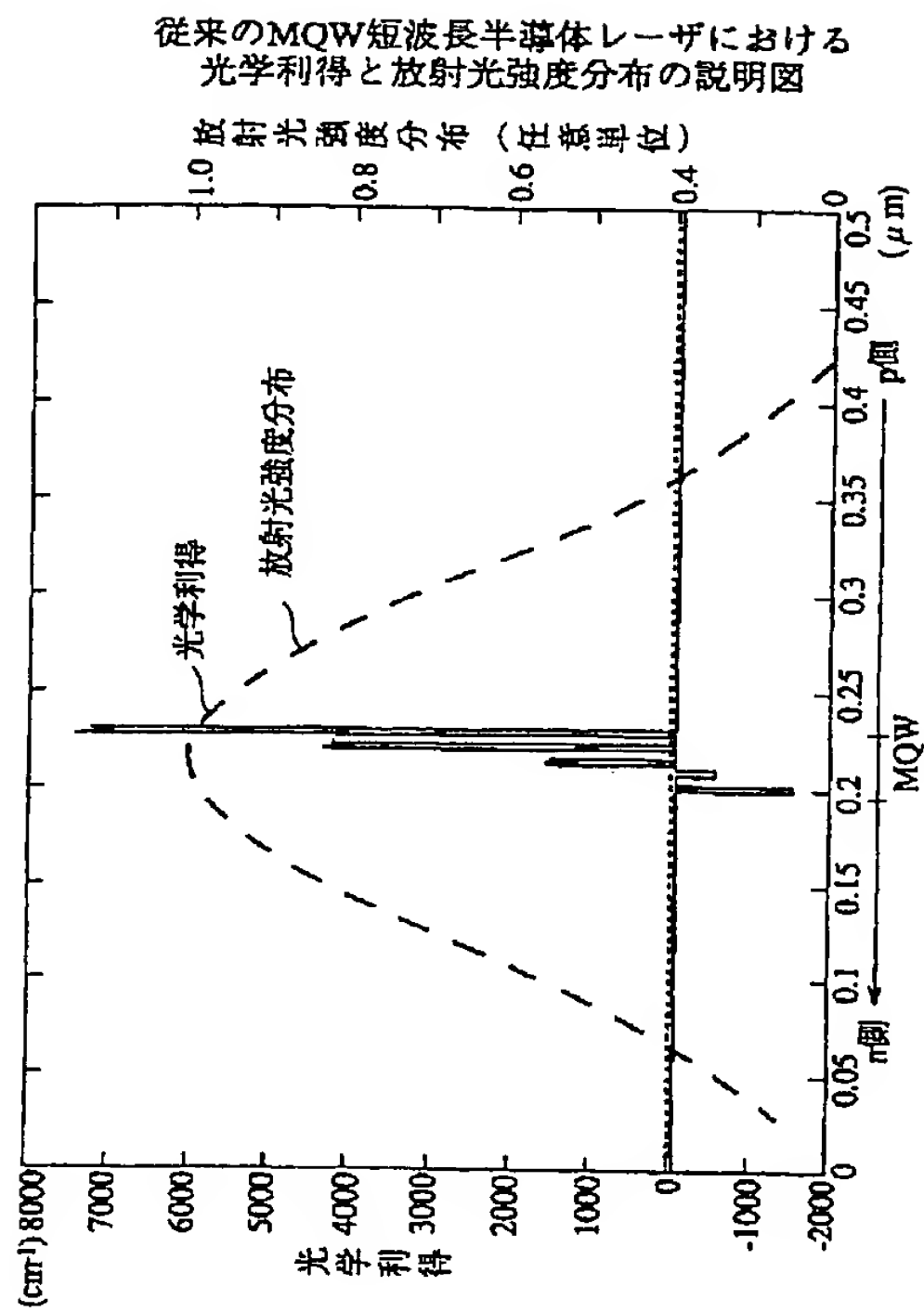
従来のMQW半導体レーザの発振時の
電子密度分布の説明図

【図40】

オーバーフロー電流のクラッド層組成依存性の説明図

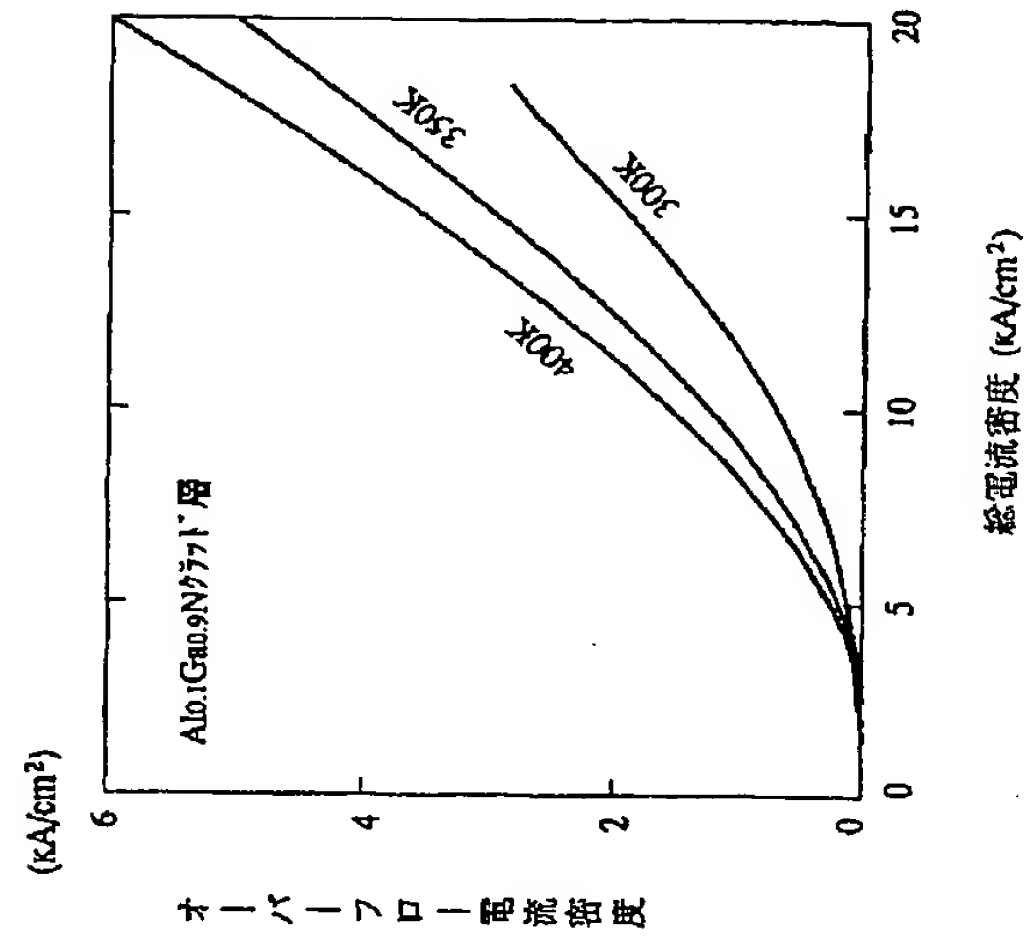


【図37】



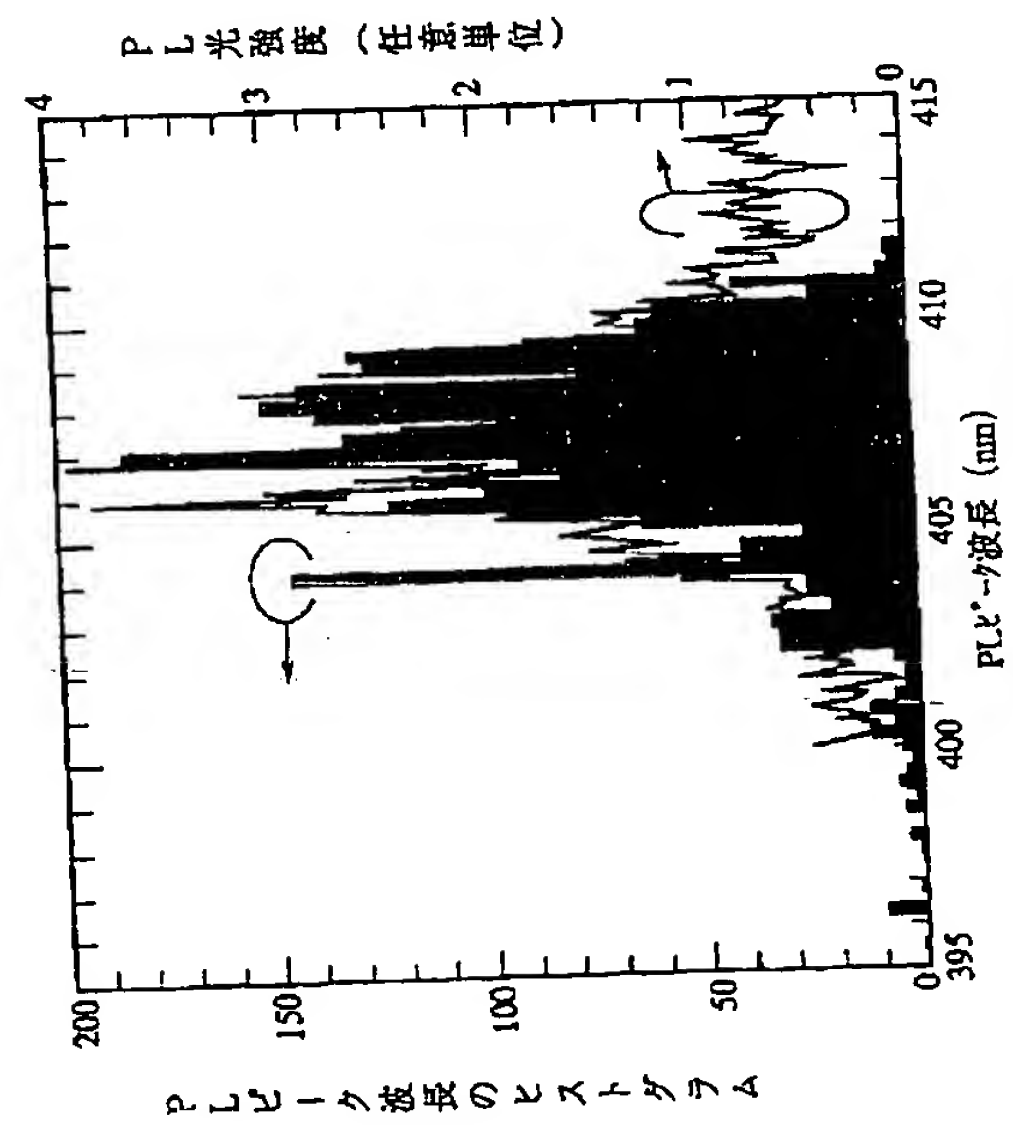
【図41】

オーバーフロー電流の素子温度依存性の説明図



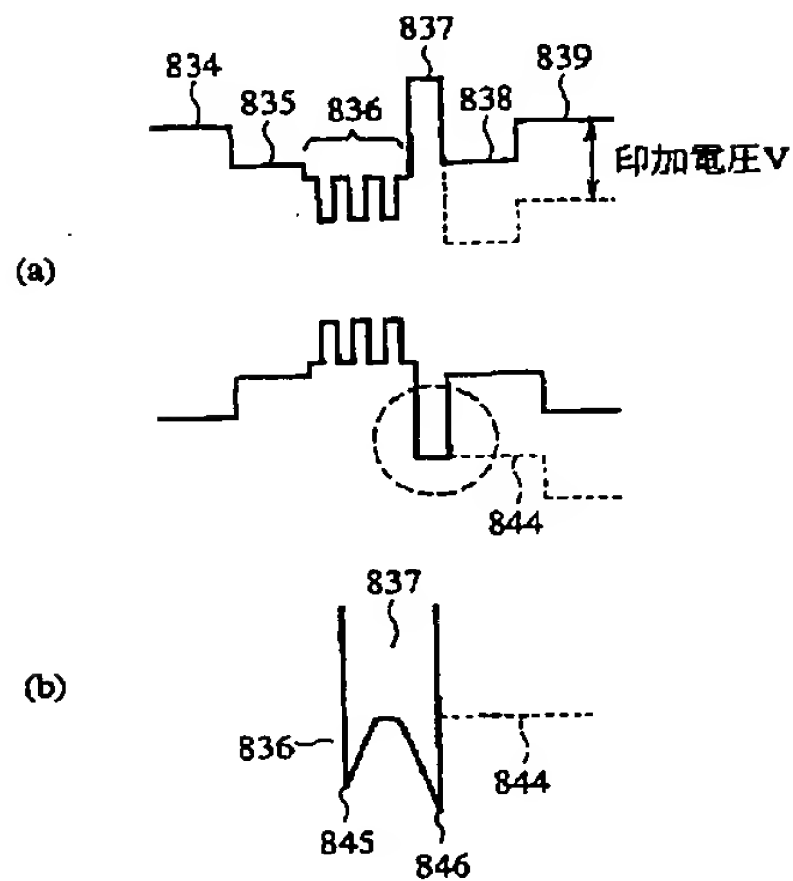
【図45】

従来の短波長半導体レーザにおける
PLピーク波長のヒストグラムと光強度の相関の説明図



【図42】

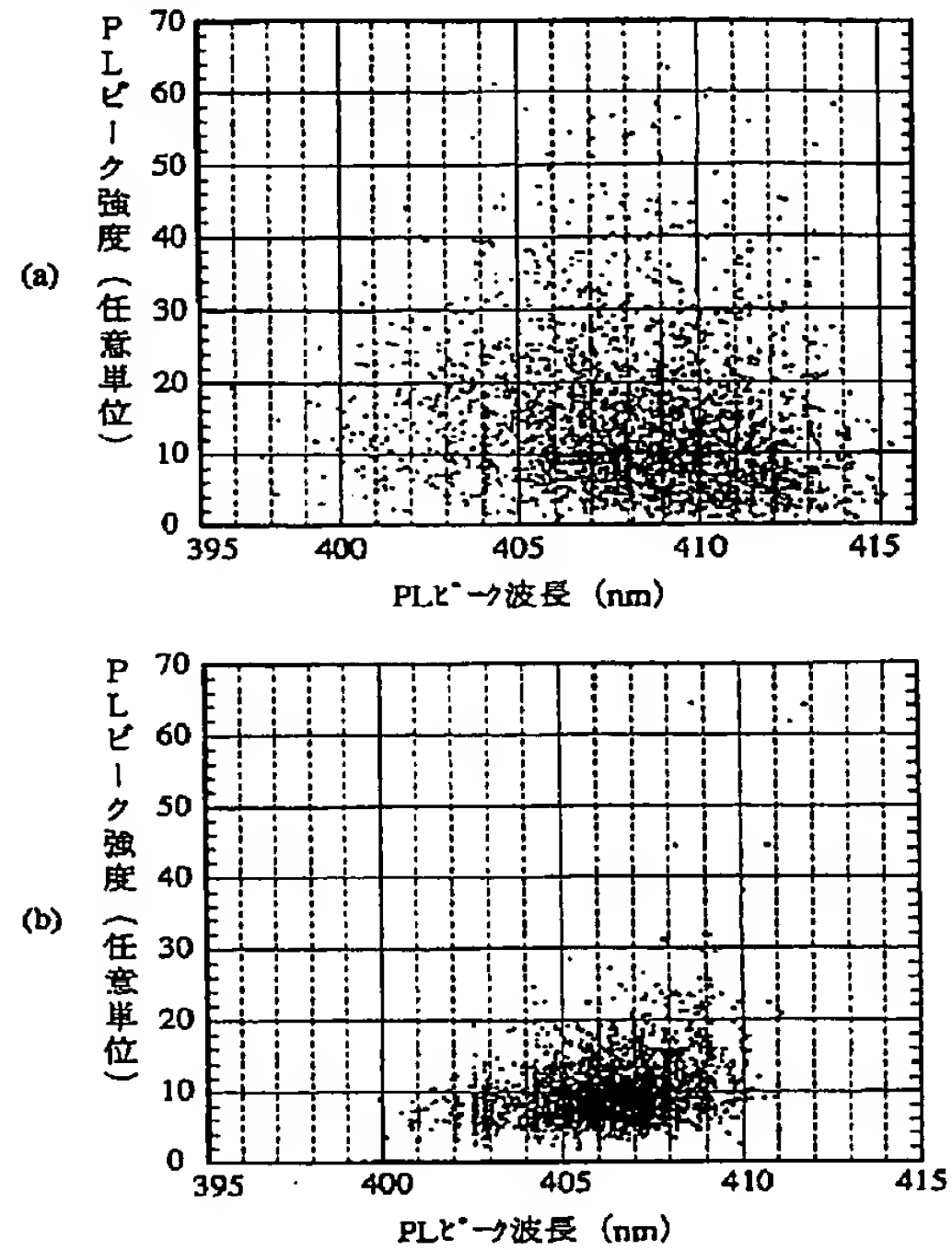
従来の短波長半導体レーザーの
バンドダイヤグラムの説明図



- 834 : n型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 835 : n型 GaN 光ガイド層
- 836 : MQW活性層
- 837 : p型 $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ ハート防止層
- 838 : p型 GaN 光ガイド層
- 839 : p型 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ クラッド層
- 844 : 電圧印加時の価電子帯のバンド端
- 845 : ノッチ
- 846 : ノッチ

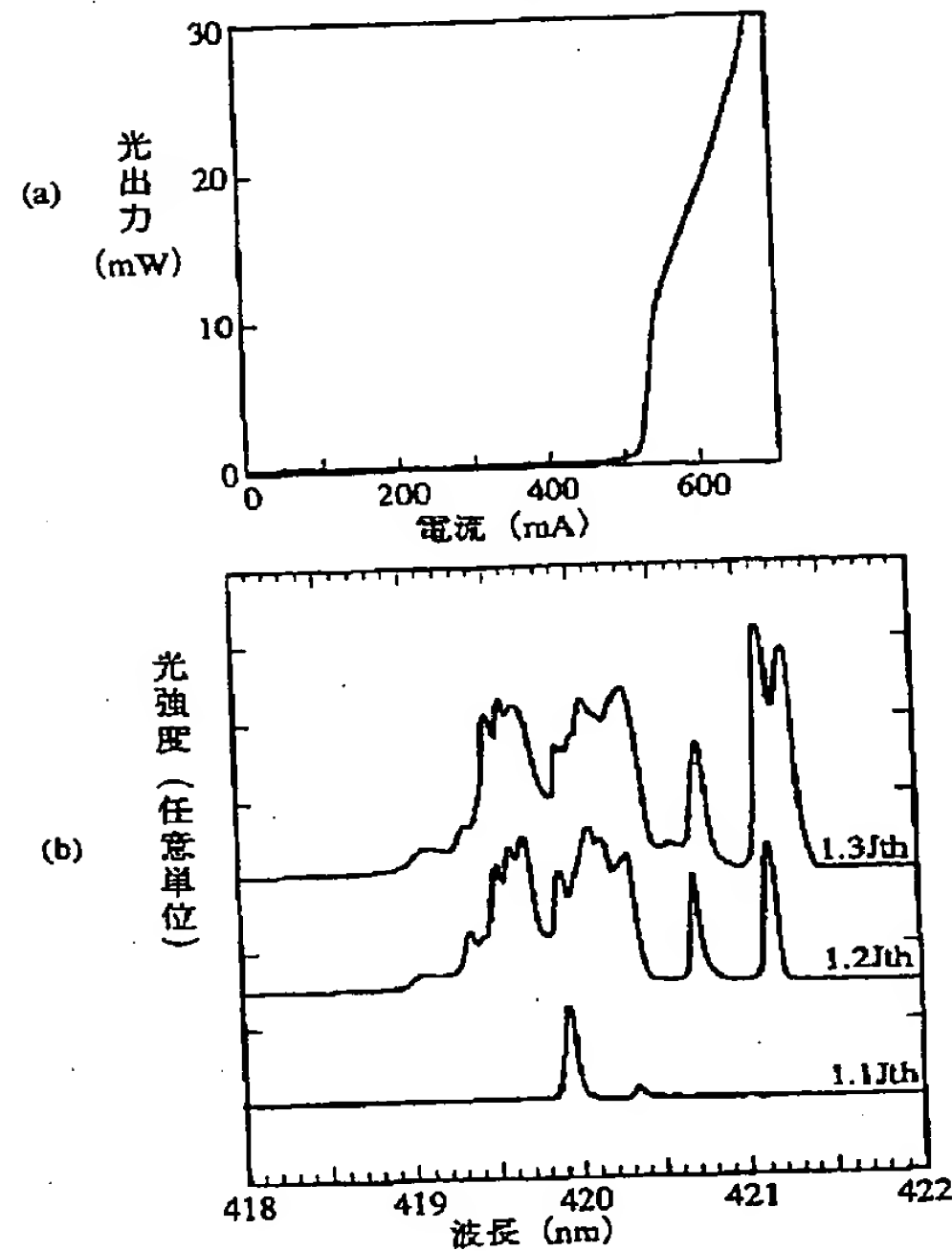
【図43】

従来の短波長半導体レーザーのPLピーク波長分布の説明図



【図44】

従来の短波長半導体レーザにおける
光出力特性の説明図



フロントページの続き

(31)優先権主張番号 特願平9-265336
(32)優先日 平9(1997)9月30日
(33)優先権主張国 日本(JP)
(31)優先権主張番号 特願平9-291020
(32)優先日 平9(1997)10月23日
(33)優先権主張国 日本(JP)
(31)優先権主張番号 特願平10-44900
(32)優先日 平10(1998)2月26日
(33)優先権主張国 日本(JP)

(31)優先権主張番号 特願平10-75652
(32)優先日 平10(1998)3月24日
(33)優先権主張国 日本(JP)
(72)発明者 窪田 晋一
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内
(72)発明者 副島 玲子
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号 富士通株式会社内